1 Medidas e incertidumbre

IDEAS FUNDAMENTALES

- Desde 1948, el Sistema Internacional de Unidades (SI) se utiliza como lenguaje mundial favorito de la ciencia y la tecnología, y refleja la mejor práctica actual de medida.
- El objetivo de los científicos es diseñar experimentos que proporcionen un «valor verdadero» de las medidas pero, debido a la precisión limitada de los aparatos de medida, normalmente los resultados se dan con un determinado grado de incertidumbre.
- Algunas magnitudes poseen dirección y módulo, mientras que otras solo poseen módulo; comprenderlo es fundamental para su correcta manipulación.

1.1 Medidas en física

Desde 1948, el Sistema Internacional de Unidades (SI) se utiliza como lenguaje mundial favorito de la ciencia y la tecnología, y refleja la mejor práctica actual de medidas

Unidades fundamentales y derivadas del SI

Para comunicarnos necesitamos compartir un mismo lenguaje, y para compartir información numérica necesitamos utilizar unas **unidades de medida** comunes. Los científicos de todo el mundo utilizan un sistema de unidades acordado internacionalmente. Es el denominado **sistema SI** (del francés «Système International»). Las unidades del SI se utilizarán a lo largo de todo el curso.

Naturaleza de la ciencia

Terminología común

Durante gran parte de los últimos 200 años muchos eminentes científicos han intentado llegar a un acuerdo sobre un sistema métrico (decimal) de unidades que pudiera ser utilizado para las medidas en la ciencia y el comercio. El hecho de disponer de un sistema común de medidas representa una valiosa ayuda para la transferencia de información científica y para el comercio internacional. En un principio podría parecer que es lo más sensato, pero existen importantes razones culturales e históricas por las que algunos países, además de algunas sociedades e individuos, se han resistido a cambiar su sistema de unidades.

El SI se formalizó en 1960 y la séptima unidad (el mol) se añadió en 1971. Anteriormente, además de las unidades del SI se utilizaban de forma generalizada las de un sistema basado en centímetros, gramos y segundos (CGS), mientras en otros países se seguía utilizando el sistema imperial (no decimal), que empleaba los pies, las libras y los segundos. Para usos cotidianos, no científicos, los habitantes de muchos países prefieren seguir utilizando los distintos sistemas que se han venido empleando popularmente durante siglos. Se ha responsabilizado a la confusión entre los distintos sistemas de unidades del fracaso de la sonda Mars en 1999, además de numerosos incidentes de aviación.

Unidades fundamentales de medida

En el SI existen **siete unidades fundamentales (básicas)**: kilogramo, metro, segundo, amperio, mol, kelvin (y candela, que *no* forma parte de este curso). En la Tabla 1.1. se enumeran las magnitudes que representan, los nombres y los símbolos de estas unidades del SI.

Se las denomina «fundamentales» porque sus definiciones no corresponden a combinaciones de otras unidades (a diferencia de los metros por segundo, por ejemplo). No es necesario aprender su definición.

Tabla 1.1 *Unidades fundamentales*

Magnitud	Nombre	Símbolo	Definición
longitud	metro	m	la distancia que atraviesa la luz en el vacío en 1/299 792 458 segundos
masa	kilogramo	kg	la masa de un cilindro de platino iridiado que se conserva en el Organismo Internacional de Pesos y Medidas en Francia
tiempo	segundo	s	la duración de 9 192 631 770 oscilaciones de la radiación electromagnética emitida entre dos niveles específicos de energía de los átomos de cesio-133
intensidad de corriente eléctrica	amperio	A	la intensidad de corriente que, cuando fluye entre dos conductores paralelos separados un metro en el vacío, produce una fuerza de 2×10^{-7} N sobre cada metro de los conductores
temperatura	kelvin	K	1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua
cantidad de sustancia	mol	mol	una cantidad de sustancia que contiene tantas partículas como átomos hay en 12 g de carbono-12

Naturaleza de la ciencia

Perfeccionamiento de la instrumentación

La obtención de medidas rigurosas y precisas de los datos experimentales es una piedra angular de la ciencia, y estas medidas dependen además de la precisión de nuestro sistema de unidades. La definición de las unidades fundamentales depende de la habilidad de los científicos para realizar medidas muy precisas, algo que ha mejorado mucho desde que se establecieron y se utilizaron estas unidades por vez primera.

Los avances científicos pueden provenir de la investigación original en nuevas áreas, pero también están impulsados por el perfeccionamiento de las tecnologías y la capacidad para la realización de experimentos más rigurosos. La astronomía es un buen ejemplo ilustrativo: los experimentos controlados generalmente no son posibles, de modo que la creciente y rápida expansión de nuestro conocimiento del Universo se ha logrado en gran parte gracias a la mejora en los datos que podemos recibir con la ayuda de las últimas tecnologías (como los telescopios de alta resolución, por ejemplo).

Unidades de medida derivadas

Todas las demás unidades de la ciencia son combinaciones de las unidades fundamentales. Por ejemplo, la unidad de volumen es el m^3 y la unidad de la velocidad es el $m\,s^{-1}$. Las combinaciones de las unidades fundamentales se denominan **unidades derivadas.**

A veces a las unidades derivadas se les otorga su propio nombre (Tabla 1.2). Por ejemplo, la unidad para la fuerza es el $kg\,m\,s^{-2}$, al que se suele denominar newton, N. Todas las unidades derivadas se introducirán y se definirán a lo largo del curso cuando sea necesario.

■ **Tabla 1.2** *Nombres de algunas unidades derivadas*

Unidad derivada	Magnitud	Combinación de unidades fundamentales
newton (N)	fuerza	$kg\,m\,s^{-2}$
pascal (Pa)	presión	$kg\,m^{-1}\,s^{-2}$
hercio (Hz)	frecuencia	s^{-1}
julio (J)	energía	$kg\,m^2\,s^{-2}$
vatio (W)	potencia	$kg\,m^2\,s^{-3}$
culombio (C)	carga	$A\,s$
voltio (V)	diferencia de potencial	$kg\,m^2\,s^{-3}\,A^{-1}$
ohmio (Ω)	resistencia	$kg\,m^2\,s^{-3}\,A^{-2}$
weber (Wb)	flujo magnético	$kg\,m^2\,s^{-2}\,A^{-1}$
tesla (T)	intensidad del campo magnético	$kg\,s^{-2}\,A^{-1}$
becquerel (Bq)	radiactividad	s^{-1}

Se espera que los alumnos de este curso escriban y reconozcan las unidades utilizando notación con superíndices; es decir, en la forma $m\,s^{-1}$ en lugar de m/s. Las unidades de la aceleración, por ejemplo, se expresan en la forma $m\,s^{-2}$.

En algunas ocasiones los físicos emplean unidades que no forman parte del SI. El electronvoltio, eV, por ejemplo, es una unidad de energía convenientemente pequeña que se utiliza frecuentemente en física atómica. Las unidades de este tipo se irán introduciendo a lo largo del curso cuando sea necesario. Los alumnos deberán saber convertir unas unidades en otras. Una de las conversiones más habituales es la del tiempo en años al tiempo en segundos.

Enlace con la teoría del conocimiento

Conceptos fundamentales

Como sucede con algunas unidades de medida, muchas de las ideas y de los principios que se emplean en física pueden describirse como «fundamentales». De hecho, se suele decir de la propia física que es una ciencia fundamental. Pero, ¿a qué nos referimos exactamente cuando decimos que algo es «fundamental»? Podríamos reemplazar este término por el término «elemental» o «básico», pero estos últimos no nos ayudan verdaderamente a comprender su verdadero significado.

Uno de los temas centrales de la física es la búsqueda de las partículas fundamentales, unas partículas que constituyen los pilares de construcción del universo y que no están constituidas, a su vez, por partículas más pequeñas y más simples. Otro tanto ocurre con las leyes y principios fundamentales: un principio físico no puede describirse como fundamental si puede explicarse mediante ideas «más simples». Muchos científicos también opinan que un principio no puede ser verdaderamente fundamental si no es relativamente simple de expresar (probablemente utilizando el lenguaje matemático). Si es demasiado complejo, tal vez es porque todavía no se ha descubierto la simplicidad subyacente.

Los principios fundamentales deben «cumplirse» en todo momento y lugar. Los principios fundamentales que consideramos actualmente han sido comprobados una y otra vez para verificar si son verdaderamente fundamentales. No obstante, *siempre* cabe la posibilidad de que, en el futuro, lo que se consideraba que era un principio fundamental acabe descubriéndose que se puede explicar mediante ideas más simples.

Consideremos dos leyes físicas muy conocidas. La *ley de Hooke* describe el estiramiento que se produce en algunos materiales como consecuencia de la acción de una fuerza sobre ellos. Se trata de una ley simple, pero no es una ley fundamental, porque no siempre es cierta. La *ley de la conservación de la energía* también es simple, pero en este caso sí se describe como fundamental, porque no se conocen excepciones.

Notación científica y multiplicadores

Notación científica

Cuando escribimos o comparamos números muy grandes o muy pequeños es conveniente utilizar la **notación científica** (también conocida como *«forma estándar»*).

En la notación científica cada número se expresa en la forma $a \times 10^b$, donde a es un número decimal mayor que 1 y menor que 10, y b es un número **entero** denominado **exponente**. Por ejemplo, en notación científica el número 434 se escribe $4{,}34 \times 10^2$; análogamente: 0,000 316 se escribe $3{,}16 \times 10^{-4}$.

La notación científica es útil para dejar claro el número de cifras significativas (véase la sección siguiente). También se utiliza para introducir y mostrar en pantalla números muy grandes o muy pequeños cuando se efectúan cálculos. La notación $\times 10^x$ o la letra *E* se suelen utilizar en los cálculos para representar «tantas veces diez elevado a...». Por ejemplo: 4,62*E*3 equivale a $4{,}62 \times 10^3$, es decir, 4620.

La generalización del uso de esta forma estándar de representación de los datos numéricos es de gran importancia para la comunicación de la información científica entre los distintos países.

Tabla 1.3 *Multiplicadores métricos (SI) estándar*

Prefijo	Abreviatura	Valor
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^9
mega	M	10^6
kilo	k	10^3
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}

Multiplicadores métricos estándar

En el lenguaje habitual empleamos los términos «miles» y «millones» para representar números grandes. Los equivalentes científicos son los prefijos kilo- y mega-. Por ejemplo, un kilovatio son mil vatios y un megajulio es un millón de julios. Análogamente, una milésima y una millonésima se representan científicamente mediante los prefijos mili- y micro-. En la Tabla 1.3. se muestra una lista de los prefijos estándar. Esta tabla figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Enlace con la teoría del conocimiento

Para una comunicación efectiva se necesita un lenguaje y una terminología comunes

¿Qué ha influido sobre el lenguaje común utilizado en la ciencia? ¿Hasta qué punto disponer de una aproximación estándar a la medición facilita el uso compartido del conocimiento en física?

Parece bastante evidente que la comunicación entre los científicos es mucho más fácil si comparten un lenguaje científico común (símbolos, unidades, notación científica estándar, etc., tal como se ha planteado en este capítulo). Pero, ¿son nuestros métodos modernos de comunicación científica y terminología los mejores posibles o pueden mejorarse? ¿Hasta dónde son un mero accidente histórico basado en los lenguajes y culturas específicas que dominaban en la época de su desarrollo?

Cifras significativas

Cuanto más precisa es una medida, mayor es el número de cifras significativas (dígitos) que pueden emplearse para representarla. Por ejemplo, una intensidad de corriente eléctrica expresada en la forma 4,20 A (a diferencia de 4,19 A o 4,21 A) sugiere una mayor precisión que la expresada en la forma 4,2 A.

Las **cifras significativas** son todos los dígitos de un dato que tienen significado, ya estén antes o después de la coma, incluyendo los ceros. Sin embargo, en ocasiones los ceros se utilizan sin más, lo que puede llevar a confusión. Por ejemplo, si nos dicen que el aeropuerto más cercano está a 100 km, puede que dudemos de si está aproximadamente a 100 km o «exactamente» a 100 km. Es un buen ejemplo de por qué es útil la notación científica. Si empleamos la forma $1{,}00 \times 10^3$ km dejamos claro que hay exactamente tres cifras significativas. En cambio 1×10^3 representa mucha menor precisión.

Cuando efectuamos *cálculos*, el resultado no puede tener más precisión que los datos utilizados para calcular ese resultado. Como regla general (y simplificada), cuando respondemos preguntas o procesamos datos experimentales, el resultado debe contener el mismo número de cifras significativas que los datos utilizados. Si el número de cifras significativas no es el mismo para todos los datos, el número de cifras significativas de la respuesta debe ser el del menos preciso de los datos (el que tiene menor número de cifras significativas). Esto se ilustra en el Ejemplo resuelto 1.

Ejemplo resuelto

1 Utiliza la ecuación

$$P = \frac{mgh}{t}$$

para determinar la potencia, P, de un motor eléctrico que levanta una masa, m, de 1,5 kg, una altura, h, de 1,128 m en un tiempo, t, de 4,79 s. ($g = 9{,}81\,\text{m s}^{-2}$)

$$P = \frac{mgh}{t} = \frac{1{,}5 \times 9{,}81 \times 1{,}128}{4{,}79}$$

Una calculadora mostraría en pantalla una respuesta de 3,4652..., pero esta respuesta sugiere una precisión muy alta que no se puede justificar a partir de los datos. El dato que contiene el menor número de cifras significativas es 1,5 kg, por tanto la respuesta debe contener este mismo número de cifras significativas:

$P = 3{,}5\,\text{W}$

«Redondeo» hasta un número apropiado de cifras significativas

El «redondeo», como en el Ejemplo resuelto 1, debe realizarse al final de la cadena de cálculos, cuando ha de darse la respuesta. Si se deben efectuar más cálculos a partir de dicha respuesta, hay que utilizar todos los dígitos que aparecían previamente en pantalla. La respuesta debe redondearse nuevamente hasta el número correcto de cifras significativas. En ocasiones, este proceso puede producir pequeñas inconsistencias aparentes entre las respuestas.

Órdenes de magnitud

La física es la ciencia fundamental que intenta explicar cómo y por qué todo lo que hay en el Universo se comporta de la forma en que lo hace. Los físicos lo estudian todo, desde los componentes más pequeños de los átomos hasta los objetos más distantes de nuestra galaxia y más allá (Figura 1.1).

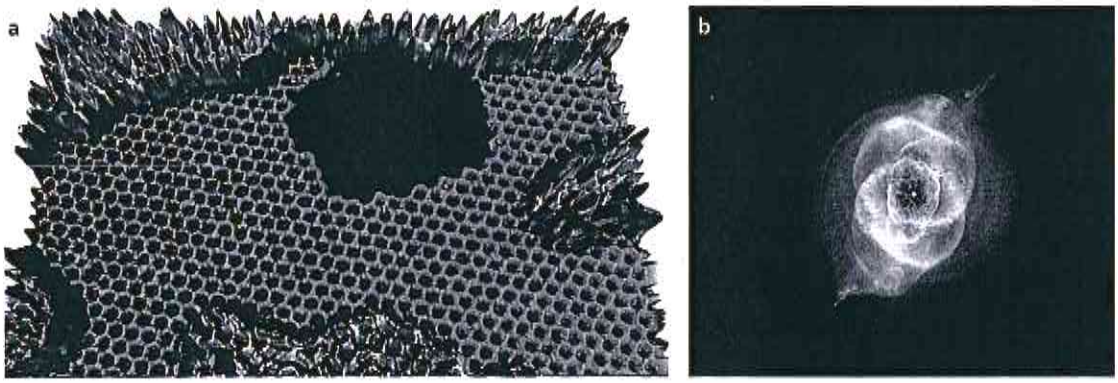


Figura 1.1
a *El comportamiento de los átomos individuales de grafeno (un material constituido por una única capa de átomos de carbono) puede observarse mediante el uso de un tipo especial de microscopio electrónico*
b *Nubes complejas de gas y polvo en la nebulosa del Ojo de Gato, a 3000 años luz de distancia*

La física es una disciplina **cuantitativa** que hace un gran uso de las matemáticas. Las medidas y los cálculos normalmente se refieren al mundo que podemos observar a nuestro alrededor (el mundo **macroscópico**), pero es posible que nuestras observaciones requieran explicaciones **microscópicas** que frecuentemente incluyen el conocimiento de las moléculas, los átomos, los iones y las partículas subatómicas. La **astronomía** es una rama de la física que estudia el otro extremo, en el que aparecen cantidades muchísimo mayores que las que podamos experimentar en nuestra vida cotidiana.

El estudio de la física, por tanto, implica trabajar tanto con números muy grandes como con números muy pequeños.

Cuando los números se alejan tanto de nuestra experiencia cotidiana puede ser difícil apreciar su verdadero tamaño. Por ejemplo, se cree que la edad del Universo es del orden de 10^{18} s, pero ¿cómo de grande es este número? La única forma sensata de responder a esta pregunta es comparando esta cantidad con alguna otra que nos resulte más familiar. Por ejemplo, la edad del Universo equivale a 100 millones de vidas humanas.

Cuando comparamos cantidades de tamaños (**magnitudes**) muy diversos, para simplificar solemos hacer aproximaciones a la potencia de 10 más cercana. Cuando un número se aproxima y se estima hasta la potencia de 10 más cercana, se dice que se está dando su **orden de magnitud**. Por ejemplo, cuando comparamos la vida de un ser humano (cuyo promedio general es de unos 70 años) con la edad del Universo ($1{,}4 \times 10^{10}$ años), podemos utilizar el cociente aproximado $10^{10}/10^{2}$. En otras palabras, la edad del Universo es de unas 10^{8} vidas humanas, o también podríamos decir que hay ocho órdenes de magnitud entre ambos valores.

Algunos ejemplos más:

- La masa de un átomo de hidrógeno es $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg. En orden de magnitud es 10^{-27} kg.
- La distancia a la estrella más cercana (*Proxima Centauri*) es $4{,}01 \times 10^{16}$ m. En orden de magnitud es 10^{17} m. (Fíjate: log de $4{,}01 \times 10^{16} = 16{,}60$, que está más cerca de 17 que de 16).
- Un día contiene 86 400 segundos. En orden de magnitud son 10^5 s

En las Tablas 1.4 a 1.6 se muestran los intervalos de masas, distancias y tiempos que aparecen en el Universo. Es muy recomendable que veas simulaciones de ordenador en las que se representen estos intervalos.

Tabla 1.4 *Intervalo de masas que aparece en el Universo*

Objeto	Masa/kg
el Universo observable	10^{53}
nuestra galaxia (Vía Láctea)	10^{42}
el Sol	10^{30}
la Tierra	10^{24}
un avión comercial grande	10^{5}
un humano adulto alto	10^{2}
un libro grande	1
una gota de lluvia	10^{-6}
un virus	10^{-20}
un átomo de hidrógeno	10^{-27}
un electrón	10^{-30}

Distancia	Tamaño/m
distancia al extremo del Universo observable	10^{27}
diámetro de nuestra galaxia (Vía Láctea)	10^{21}
distancia a la estrella más cercana	10^{16}
distancia al Sol	10^{11}
distancia a la Luna	10^{8}
radio de la Tierra	10^{7}
altitud de crucero de un avión	10^{4}
altura de un niño	1
crecimiento de un cabello humano en un día	10^{-4}
diámetro de un átomo	10^{-10}
diámetro de un núcleo	10^{-15}

Tabla 1.5 *Intervalo de distancias que aparece en el Universo*

Periodo de tiempo	Intervalo de tiempo/s
edad del Universo	10^{18}
tiempo transcurrido desde la extinción de los dinosaurios	10^{15}
tiempo transcurrido desde la aparición del ser humano sobre la Tierra	10^{13}
tiempo transcurrido desde la construcción de las pirámides de Egipto	10^{11}
duración de una vida humana en promedio	10^{9}
un día	10^{5}
tiempo que transcurre entre dos latidos humanos	1
periodo correspondiente a un sonido de alta frecuencia	10^{-4}
tiempo que tarda la luz en atravesar una habitación	10^{-8}
periodo de oscilación de una onda de luz	10^{-15}
tiempo que tarda la luz en atravesar un núcleo	10^{-23}

Tabla 1.6 *Intervalo de tiempos que aparece en el Universo*

Estimación

A veces no disponemos de los datos necesarios para efectuar un cálculo exacto o bien puede ocurrir que tengamos que dar una respuesta muy rápida. En ocasiones la pregunta es tan vaga que dar una respuesta apropiada es simplemente imposible. La capacidad de establecer una estimación sensata es una habilidad muy útil que necesita de mucha práctica. El Ejemplo resuelto y las preguntas 2-5 que se proponen a continuación son ejemplos típicos de cálculos que no tienen una respuesta exacta.

Cuando se efectúan estimaciones, cada persona puede establecer una respuesta distinta, de manera que lo más apropiado es emplear una única cifra significativa (o dos como máximo). A veces solo es necesario dar un orden de magnitud.

Ejemplo resuelto

2 Estima la masa del aire de un aula (densidad del aire = 1,3 kg m^{-3})

Un aula convencional puede tener unas dimensiones de 7 m x 8 m x 3 m, de modo que su volumen es de unos 170 m^3

masa = densidad x volumen = 170 x 1,3 = 220 kg

Como se trata de una estimación, tal vez sería más apropiado dar una respuesta de 200 kg. En orden de magnitud correspondería a 10^2 kg

1 Estima la masa de:
   a una hoja de un libro
   b el aire que contiene una botella
   c un perro
   d el agua que contienen los océanos de la Tierra.

2 Proporciona una estimación para las preguntas siguientes:
   a la altura de un edificio de tres pisos
   b el número de veces que gira una rueda a lo largo de la vida útil de un coche
   c cuántos granos de área caben en una taza
   d el espesor de una hoja de un libro.

3 Estima los periodos de tiempo siguientes:
   a cuántos segundos contiene una vida humana media
   b cuánto tardaría una persona en dar una vuelta completa a la Tierra (ignora el tiempo durante el que no camina)
   c cuánto tarda la luz en atravesar una habitación.

4 Averigua los datos necesarios para poder comparar las medidas siguientes. (Da tu respuesta en forma de orden de magnitud).
   a la distancia a la Luna con respecto a la circunferencia de la Tierra
   b la masa de la Tierra con respecto a la masa de una manzana
   c el tiempo que tarda la luz en atravesar un metro con respecto al tiempo que transcurre entre tus latidos.

1.2 Incertidumbre y errores

El objetivo de los científicos es diseñar experimentos que puedan proporcionar un «valor exacto» de sus medidas, pero debido a la precisión limitada de los aparatos de medida, normalmente expresan los resultados con un determinado grado de incertidumbre

Naturaleza de la ciencia

Certidumbre

Aunque los científicos se distinguen por la búsqueda de las respuestas «exactas», toda medida contiene inevitablemente un grado de incertidumbre. Los resultados de *toda* investigación científica contienen incertidumbres y errores, aunque el objetivo de una investigación de calidad es minimizarlos tanto como sea posible.

Cuando recibimos datos numéricos de cualquier clase (ya sean científicos o de otro tipo), necesitamos saber hasta dónde podemos creernos la información que estamos leyendo o escuchando. La presentación de los resultados de una investigación científica rigurosa debe contener siempre una evaluación de la incertidumbre asociada a los resultados, ya que esta constituye parte integral del proceso científico. Desafortunadamente no ocurre lo mismo para mucha de la información que recibimos a través de los medios de comunicación, que suele presentarse demasiado a menudo de forma poco crítica y poco científica, sin referencias a las fuentes y a su fiabilidad.

Ya podemos intentarlo de todas las maneras, incluso con los mejores instrumentos de medida; simplemente no es posible medir algo. Y eso es por una razón: las cosas que queremos medir no existen como cantidades perfectamente exactas; de hecho, no hay ningún motivo para lo que lo sean.

En consecuencia, *toda* medida es una aproximación. Puede que una medida sea la más exacta que se haya hecho jamás; por ejemplo, puede establecerse que la anchura de una regla es 2,283 891 03 cm, pero todavía no es un valor perfecto, y si lo fuera, no lo sabríamos, porque siempre necesitaríamos un instrumento más preciso para comprobarlo. En este ejemplo tenemos, además, una complicación adicional: cuando medimos longitudes muy pequeñas, tenemos que lidiar con la naturaleza atómica de los objetos que estamos midiendo. (¿Cuál es el límite de un átomo?)

La **incertidumbre** es el intervalo, por encima y por debajo de un valor dado, en el que cabe esperar que se encuentren los valores de las medidas repetidas de un experimento. Por ejemplo, si la altura media que alcanza el rebote de una pelota cuando esta se lanza (desde una misma altura) es 48 cm y las medidas experimentales de dicho rebote se encuentran en el intervalo entre 45 cm y 51 cm, el resultado de la medida experimental del rebote debería expresarse como 48 ± 3 cm. La incertidumbre es ± 3 cm, aunque suele expresarse mejor en forma de porcentaje, en este ejemplo $\pm 6\%$. Obviamente, lo deseable es que los experimentos den resultados con baja incertidumbre, a este tipo de medidas se las denomina **precisas**. Pero, ¡a veces los resultados precisos son incorrectos!

Cuanto más precisa es una medida, mayor es el número de cifras significativas (dígitos) que pueden emplearse para representarla.

Si se conoce el valor correcto («verdadero») de una magnitud y la medida experimental que se obtiene no coincide con dicho valor, hablamos de **error** experimental. Es decir, se produce un error en una medida cuando su resultado no coincide con el valor correcto. Por ejemplo, si un alumno obtiene experimentalmente el valor 49 cm para la altura del rebote de una pelota, pero la observación de un registro de video muestra que el valor correcto es 48 cm, el error de la medida es de + 1 cm.

Todas las medidas comportan errores, ya sean grandes o pequeños, que obedecen a distintas causas, pero, en todo caso, no deben confundirse con las equivocaciones. Los errores pueden clasificarse como *aleatorios* o *sistemáticos* (ver más abajo), aunque, hasta cierto punto, todas las medidas llevan asociados errores de ambos tipos.

Los términos *error* e *incertidumbre* se utilizan con el mismo significado, aunque esta identificación solo tiene sentido cuando nos referimos a experimentos que tienen un resultado verdadero conocido.

Enlace con la teoría del conocimiento

El conocimiento científico es provisional

«Uno de los objetivos de las ciencias físicas es proporcionar un retrato exacto del mundo material. Uno de los logros de la física del siglo XX ha sido demostrar que este objetivo es inalcanzable».

Jacob Bronowski

¿Pueden los científicos estar verdaderamente seguros de sus descubrimientos?

La creencia popular es que la ciencia trabaja con «hechos» y, en gran parte, es así; pero esta creencia también proporciona una impresión incompleta de la naturaleza de la ciencia. La afirmación es engañosa, en tanto que puede sugerir que los científicos creen que han desvelado determinadas «verdades» universales para siempre. El conocimiento científico es provisional y está completamente abierto a los cambios a medida que se van realizando nuevos descubrimientos. Es más, esta es la naturaleza esencial de la ciencia, y los buenos científicos fomentan la revisión del «conocimiento» existente y la búsqueda del perfeccionamiento y el progreso.

Distintas clases de incertidumbre

La incertidumbre en las medidas experimentales que se trata en el presente capítulo es consecuencia de las limitaciones de los científicos y de sus equipos para obtener resultados 100% exactos. No obstante, debemos también tener en cuenta que el propio acto de medir puede cambiar lo que estamos intentando medir. Por ejemplo, el hecho de conectar un amperímetro a un circuito eléctrico puede tener un efecto sobre la intensidad de la corriente que se desea medir, por muchos esfuerzos que se realicen para minimizar dicho efecto. Análogamente, el hecho de poner un termómetro en un líquido caliente altera su temperatura.

La «incertidumbre» también aparece como un importante concepto en la física moderna: el principio de incertidumbre de Heisenberg trata del comportamiento de las partículas subatómicas y se explica en el capítulo 12 (alumnos de Nivel Avanzado). Una de sus ideas centrales es que cuanta mayor es la precisión con la que se conoce la posición de una partícula, menor es la precisión con la que se conoce su momento, y viceversa. Sin embargo, hay que recalcar que el principio de incertidumbre de Heisenberg es una característica fundamental de la física cuántica y que no tiene nada que ver con los límites experimentales de la tecnología de laboratorio actual.

Errores aleatorios y sistemáticos

Errores aleatorios

Los **errores aleatorios** son inevitables, porque las medidas exactas son imposibles. Los valores obtenidos experimentalmente pueden ser mayores o menores que el valor correcto y se distribuyen de forma aleatoria a su alrededor.

Por regla general, los errores aleatorios son desconocidos e impredecibles. Su existencia se debe a múltiples razones, entre las que se encuentran:

- limitaciones de la escala o la pantalla que se esté utilizando
- lecturas de la escala desde posiciones incorrectas
- irregularidad en los tiempos de reacción de la persona que manipula un cronómetro
- dificultad para realizar observaciones que cambian rápidamente con el tiempo.

La lectura obtenida a partir de un instrumento de medida está limitada por la menor división de su escala. Es lo que se denomina **error de legibilidad** (o **de lectura**). Por ejemplo, un termómetro de vidrio con un líquido en su interior, con una escala en la que solo vienen marcados los grados (23 °C, 24 °C, 25 °C, etc.) no es fiable para medir intervalos de temperatura de 0,1 °C. Normalmente se considera que el error asociado a una escala **analógica** (continua), como la del termómetro de vidrio del ejemplo anterior, es la mitad de la división más pequeña, para este ejemplo ± 0,5 °C. En el caso de instrumentos **digitales** se considera que el error corresponde a la menor división que puede mostrar en pantalla el instrumento de medida. En la Figura 1.2 se muestran dos amperímetros, uno analógico y el otro digital, que pueden utilizarse para medir la intensidad de la corriente eléctrica.

Un motivo muy habitual por el que aparecen errores aleatorios es la lectura de una escala analógica desde una posición incorrecta. Se denomina **error de paralaje** y en la Figura 1.3 se muestra un ejemplo de este tipo de error.

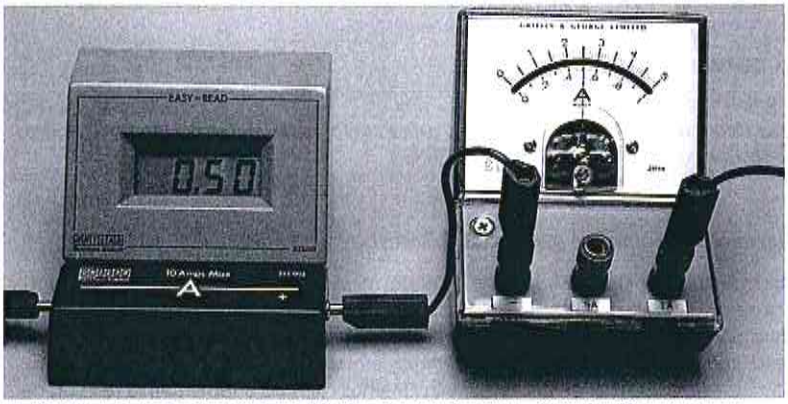


Figura 1.2 *Amperímetro analógico y amperímetro digital utilizados para medir la misma intensidad de corriente eléctrica*

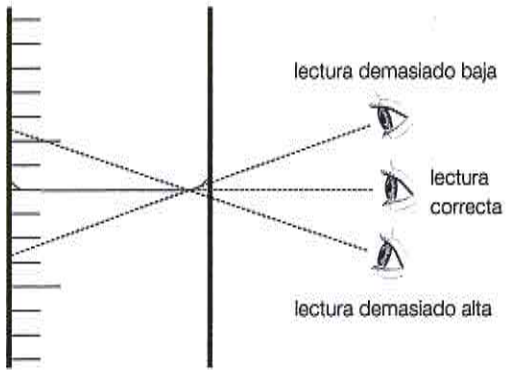


Figura 1.3 *Error de paralaje cuando se lee el nivel de líquido en un cilindro de medida*

Errores sistemáticos

Un **error sistemático** se produce cuando algo funciona mal de *manera repetida*, ya sea en el instrumento de medida o en el método empleado. Una lectura que presenta un error sistemático siempre es o más alta o más baja que el valor correcto y siempre en la misma cantidad. Las causas más frecuentes de estos errores son instrumentos que tienen una escala incorrecta (mal **calibrada**), o instrumentos que tienen un valor inicial incorrecto, como por ejemplo un medidor que muestra en pantalla un determinado valor cuando la lectura debería ser cero. Este error se denomina **error de calibración de cero**, del que se muestra un ejemplo en la Figura 1.4. Un termómetro que registra de forma incorrecta la temperatura de una habitación produce errores sistemáticos cuando se utiliza para medir otras temperaturas.

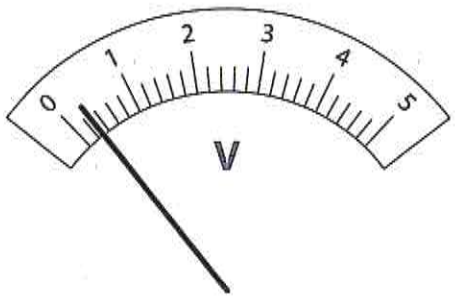


Figura 1.4 *Este voltímetro tiene un error de calibración de cero de 0,3 V, por tanto todas las lecturas se verán incrementadas por igual en 0,3 V*

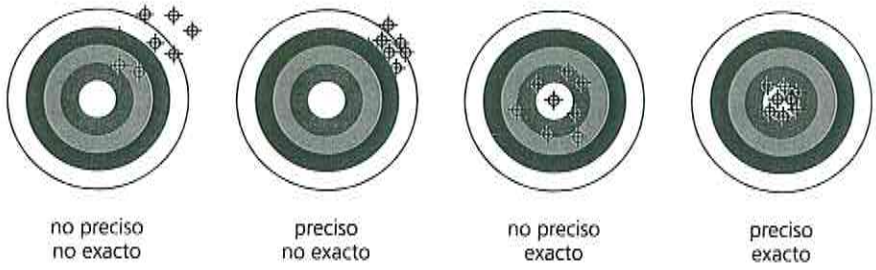
Exactitud

Se dice que una medida cercana al valor correcto (si este se conoce) es una medida **exacta**, pero, en el lenguaje científico, el término *exacto* también significa que un conjunto de medidas realizadas durante un experimento posee un pequeño error sistemático. Por tanto, un conjunto de medidas exactas se distribuye de forma prácticamente uniforme alrededor del valor correcto

(ya sea cerca o lejos de este), de manera que el promedio de estas medidas estará cerca del valor verdadero.

En muchos experimentos puede suceder que se desconozca el valor «correcto», lo que comporta que la exactitud de las medidas no se puede conocer con certeza. En estos casos, la calidad de la medida se puede juzgar mejor mediante su **precisión**: ¿pueden repetirse los mismos resultados?

Las diferencias entre precisión y exactitud pueden ilustrarse mediante el ejemplo de unas flechas y una diana, como en la Figura 1.5. El tiro es preciso si las flechas están agrupadas muy cerca unas de otras, y exacto si las flechas se distribuyen de forma prácticamente uniforme alrededor del centro de la diana. El último diagrama representa *tanto* exactitud *como* precisión, aunque en el lenguaje cotidiano hablaríamos simplemente de precisión.



■ **Figura 1.5** *Diferencia entre precisión y exactitud*

Un reloj que siempre se adelanta 5 minutos se puede decir que es preciso, pero no es exacto. Es un claro ejemplo de error de calibración de cero sistemático. El uso de un cronómetro manual para cronometrar una carrera de 100 m puede proporcionar resultados exactos (si no hay errores sistemáticos), pero es poco probable que sea preciso, porque los tiempos de reacción humanos dan lugar a errores aleatorios significativos.

Identificación y reducción de los efectos de los errores

Si disponemos de una única medida de una determinada magnitud, puede que no tengamos manera de saber lo cerca que está del resultado correcto; es decir, probablemente desconocemos la magnitud de cualquier error de la medida. Pero si repetimos la medida y los resultados son similares (baja incertidumbre, alta precisión) aumenta nuestra confianza en los resultados del experimento, sobre todo si hemos revisado cualquier causa posible de error sistemático.

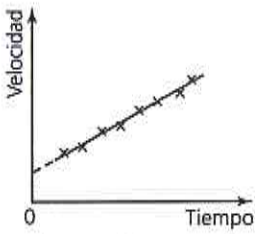
La manera más habitual de reducir los efectos de los *errores aleatorios* es mediante la repetición de experimentos y el cálculo del promedio de los resultados, que debería estar más cerca del valor correcto que la mayoría, o la totalidad, de las medidas individuales. Cualquier valor inusual (**anómalo**) debe ser verificado y probablemente excluido del cálculo del promedio.

Muchos experimentos implican la realización de un intervalo de medidas, cada una bajo unas condiciones experimentales distintas, de forma que se pueda representar una gráfica que muestre el patrón de resultados. (Por ejemplo, cambiando el voltaje de un circuito eléctrico para ver cómo afecta a la intensidad de corriente eléctrica). Si aumentamos el número de pares de medidas reducimos también los efectos de los errores aleatorios porque la recta de ajuste puede dibujarse con mayor fiabilidad.

Los experimentos deben diseñarse, dentro de lo posible, para que produzcan lecturas grandes. Por ejemplo, podemos leer las divisiones de una regla hasta la mitad de un milímetro, y otro tanto les ocurre a las medidas que realicemos con este instrumento. Cuando medimos una longitud de 90 cm probablemente este error se puede considerar aceptable (es un porcentaje de error del 0,56%), pero este mismo porcentaje de error cuando medimos solo 2 mm es probablemente inaceptable. Cuanto más grande es la lectura de una medida (realizada con un determinado instrumento), menor será su error asociado. Si esto no es posible, puede que sea necesario sustituir el instrumento de medida por otro con divisiones más pequeñas.

Puede ocurrir que llevemos a cabo un experimento cuidadosamente y con instrumentos de buena calidad y, en cambio, tengamos errores aleatorios importantes. Las causas pueden ser diversas y es posible que tengamos que rediseñar el experimento para soslayar los problemas. El uso de un cronómetro para medir el tiempo que tarda en llegar al suelo un objeto que dejamos caer o la medida de la altura del rebote de una pelota son dos ejemplos de experimentos simples que pueden dar lugar a errores aleatorios significativos.

Los efectos de los *errores sistemáticos* no pueden reducirse repitiendo las medidas. Los instrumentos deben revisarse antes de ser utilizados para detectar posibles errores, pero puede ocurrir que no detectemos un error sistemático hasta que hayamos representado gráficamente los resultados y veamos que la recta de ajuste no interseca el eje vertical de la forma esperada, como se muestra en la Figura 1.6. En un caso así lo más conveniente es aumentar o disminuir todas las medidas una misma magnitud si es que se puede determinar la causa del error sistemático.



■ **Figura 1.6** *La recta de ajuste para esta gráfica velocidad-tiempo, correspondiente a un carrito que cae rodando por una pendiente desde una posición de reposo, no pasa por el origen, por tanto ha habido probablemente un error sistemático*

■ Incertidumbre absoluta, relativa y en porcentaje

Incertidumbre y datos experimentales

La incertidumbre correspondiente a un dato experimental puede expresarse mediante una de estas tres formas:

- La **incertidumbre absoluta** de una medida es el intervalo, por encima y por debajo del valor dado, dentro del que esperamos que se encuentre cualquier medida repetida que hagamos. Por ejemplo, podemos expresar la masa de un bolígrafo en la forma 53,2 g ± 0,1 g, donde la incertidumbre es ± 0,1 g.
- La **incertidumbre relativa** es el cociente entre la incertidumbre absoluta y el valor medido.
- El **porcentaje de incertidumbre** es la incertidumbre relativa expresada en porcentaje.

La incertidumbre expresada en porcentaje suele ser la que proporciona mayor información. Lo deseable es que un experimento produzca resultados con incertidumbre menor del 5%, pero no siempre es posible.

Ejemplo resuelto

3 La masa de una pieza de metal se expresa en la forma 346 g ± 2,0%.
a ¿Cuál es la incertidumbre absoluta?
b ¿Cuál es el rango de valores esperado que puede tomar la masa?
c ¿Cuál es la incertidumbre relativa?

a el 2% de 346 g es ± 7 g (aproximando a gramos, como el dato inicial)

b entre 339 g y 353 g (con 3 cifras significativas)

c el 2% equivale a $\frac{1}{50}$

Lo ideal sería expresar todas las medidas experimentales con la incertidumbre asociada, pero puede resultar repetitivo y tedioso en un contexto de aprendizaje, de modo que se suelen omitir hasta que se trabaja con este tema de forma específica.

Normalmente es fácil decidir el valor de la incertidumbre asociada a una medida aislada realizada con un determinado instrumento. Se suele identificar esta incertidumbre con el error de lectura, tal como hemos descrito anteriormente. Sin embargo, a veces es difícil decidir cuál es la incertidumbre global asociada a una medida teniendo en cuenta todas las dificultades experimentales. Por ejemplo, el error de lectura de un cronómetro puede ser 0,01 s, pero la incertidumbre asociada a sus medidas puede ser mucho mayor como consecuencia de los tiempos de reacción humanos.

La mayor o menor dispersión de las lecturas alrededor del valor medio puede ser útil como guía para estimar la incertidumbre aleatoria, pero no así para la incertidumbre sistemática. Una vez calculado el valor medio de las lecturas, puede establecerse que la incertidumbre aleatoria es la máxima diferencia entre una lectura aislada y el valor medio. Esto último se ilustra en el ejemplo resuelto siguiente.

Ejemplo resuelto

4 Las medidas siguientes (en cm) corresponden a las lecturas de un experimento para medir la altura del rebote de una pelota: 32, 29, 33, 32, 37 y 28. Estima los valores de la incertidumbre aleatoria (absoluta y en porcentaje) asociados al experimento.

La media aritmética de estas seis lecturas es 31,83 cm, pero sería más adecuado expresarla con dos cifras significativas (32 cm), como los datos originales. La lectura que presenta la mayor diferencia con este valor medio es 37 cm, por tanto 5 cm es una posible estimación de la incertidumbre absoluta; en porcentaje, la incertidumbre es: (5/37) x 100 = 14%.

Fíjate en que si los mismos datos se hubieran obtenido en el orden: 28, 29, 32, 32, 33, 37, sería difícil de creer que las incertidumbres fueran aleatorias y sería necesario encontrar otra explicación para la variación de resultados.

Incertidumbre en resultados calculados

Cuando efectuamos cálculos basados en datos experimentales, se supone que conocemos la incertidumbre asociada a cada medida individual. Por tanto, es importante saber cómo utilizar estas incertidumbres individuales para determinar la incertidumbre de cualquier resultado calculado a partir de estos datos.

Consideremos un ejemplo simple: medimos la distancia recorrida por un carrito que se desplaza a velocidad constante, 76 cm ± 2 cm (± 2,6%) durante un tiempo de 4,3 s ± 0,2 s (± 4,7%).

Podemos calcular la velocidad a partir del cociente distancia/tiempo = 76/4,3 = 17,67..., que se expresa como 18 m s^{-1} cuando lo redondeamos a dos cifras significativas, por consistencia con los datos experimentales.

Para determinar la incertidumbre de este resultado, consideramos las incertidumbres asociadas a la distancia y al tiempo. Si utilizamos la distancia más larga y el tiempo más corto, la mayor respuesta posible para la velocidad es 78/4,1 = 19,02... Si utilizamos la menor distancia y el tiempo más largo, la menor respuesta posible para la velocidad es 74/4,5 = 16,44... (Los números los redondearemos al final de los cálculos).

La velocidad se encuentra, por tanto, entre 16,44 cm s^{-1} y 19,02 cm s^{-1}. El valor 19,02 presenta la mayor diferencia (1,35) respecto a 17,67. Así pues, el resultado final puede expresarse como 17,67 ± 1,35 cm s^{-1}, que representa una incertidumbre máxima del 7,6%. Si redondeamos a dos cifras significativas, el resultado pasa a ser 18 ± 1 cm s^{-1}.

Los cálculos de la incertidumbre según el método anterior pueden llegar a ser muy farragosos, de modo que, en este curso, *se aceptarán los métodos aproximados*. Por ejemplo, en el cálculo de la velocidad que acabamos de realizar, la incertidumbre de los datos fue del ± 2,6% para la distancia y del ± 4,7% para el tiempo. El porcentaje de incertidumbre del resultado final se puede aproximar mediante la suma de los porcentajes de incertidumbre de los datos de partida: 2,6 + 4,7 = 7,3%. Con este método aproximado obtenemos más o menos el mismo valor que el que habíamos calculado utilizando los valores mayores y menores posibles de la velocidad. A continuación se dan algunas reglas para estimar la incertidumbre en el caso de resultados calculados.

Reglas para estimar la incertidumbre en resultados calculados

- Para cantidades que proceden de adición o substracción: sumar las incertidumbres absolutas. En el *Apéndice de datos de Física* esto se expresa como:

  Si $y = a \pm b$ entonces $\Delta y = \Delta a + \Delta b$

- Para cantidades que proceden de multiplicación o de división: sumar las incertidumbres relativas individuales o los porcentajes de incertidumbre individuales. En el *Apéndice de datos de Física* esto se expresa como:

  Si $y = \frac{ab}{c}$ entonces $\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c}$

- Para cantidades que proceden de elevar a una potencia, *n*, el *Apéndice de datos de Física* da:

  Si $y = a^n$ entonces $\frac{\Delta y}{y} = \left|n\left(\frac{\Delta a}{a}\right)\right|$

- Para otras funciones (como las trigonométricas, logarítmicas o raíces cuadradas): calcular los valores absolutos mayores y menores posibles y comparar con el valor medio, tal como se muestra a continuación en el ejemplo resuelto. Ten en cuenta, no obstante, que aunque estos cálculos puedan tener lugar en conexión con el trabajo de laboratorio, *no* se pedirán en los exámenes.

Ejemplo resuelto

5 La medida de un ángulo θ, resulta ser $34° \pm 1°$. ¿Cuál es la incertidumbre asociada a la inclinación de este ángulo?

tg 34° = 0,675 tg 33° = 0,649 tg 35° = 0,700

Mayor incertidumbre absoluta = 0,675 − 0,649 = 0,026
(0,700 − 0,675 = 0,025, que es menor que 0,026)

Por tanto, tg θ = 0,67 ± 0,03 (utilizando el mismo número de cifras significativas que en los datos originales).

5 Se añade una masa de 346 ± 2 g a una masa de 129 ± 1 g.
a ¿Cuál es la incertidumbre absoluta global?
b ¿Cuál es el porcentaje de incertidumbre global?

6 La ecuación $s = \frac{1}{2}at^2$ se emplea para calcular el valor de s cuando a es $4,3 \pm 0,2\,m\,s^{-2}$ y t es $1,4 \pm 0.1\,s$.
a Calcula el valor de s.
b Calcula el porcentaje de incertidumbre de los datos del enunciado.
c Calcula el porcentaje de incertidumbre de la respuesta.
d Calcula la incertidumbre absoluta de la respuesta.

7 La medida de una cierta magnitud resulta ser (1,46 ± 0,08). ¿Cuál es la máxima incertidumbre de la raíz cuadrada de esta magnitud?

Uso de las hojas de cálculo para calcular incertidumbres

Las hojas de cálculo pueden resultar muy útiles cuando hay que efectuar múltiples cálculos de incertidumbres asociadas a resultados experimentales. Por ejemplo, la resistividad, ρ, de un alambre puede calcularse mediante la ecuación $\rho = R\pi r^2/l$, donde r y l son el radio y la longitud del alambre, respectivamente, y R es su resistencia. En la figura 1.7 se muestran los **datos sin procesar** (sombreados en verde) de un experimento en el que se mide la resistencia de varios alambres de un mismo metal. En el resto de la hoja de cálculo se muestran los cálculos correspondientes al proceso de datos para determinar la resistividad y la incertidumbre en el resultado. Se puede utilizar un programa de ordenador para dibujar una gráfica de los resultados, que además puede incluir barras de error (véase página 13).

RESISTENCIA		RADIO			LONGITUD		RESISTIVIDAD		
Resistencia $R/\Omega \pm 0,2\ \Omega$	Porcentaje de incertidumbre en R	Radio, r/mm ± 0,01 mm	Porcentaje de incertidumbre en r	Porcentaje de incertidumbre en r^2	Longitud, l/cm ± 1 cm	Porcentaje de incertidumbre en l	Resistividad, $\rho = R\pi r^2/l/\Omega m$	Porcentaje de incertidumbre en ρ	Incertidumbre absoluta en $\rho/\Omega m$
9,4	2,1	0,15	6,7	13,3	44	2,3	0,0000015	18	0,0000003
6,2	3,2	0,22	4,5	9,1	67	1,5	0,0000014	14	0,0000002
6,2	3,2	0,25	4,0	8,0	80	1,3	0,0000015	12	0,0000002
5,2	3,8	0,30	3,3	6,7	99	1,0	0,0000015	12	0,0000002
5,0	4,0	0,35	2,9	5,7	128	0,8	0,0000015	10	0,0000002
3,8	5,3	0,43	2,3	4,7	149	0,7	0,0000015	11	0,0000002
3,4	5,9	0,51	2,0	3,9	175	0,6	0,0000016	10	0,0000002
2,4	8,3	0,62	1,6	3,2	198	0,5	0,0000015	12	0,0000002

Figura 1.7 *Uso de una hoja de cálculo para calcular indeterminaciones asociadas a un experimento de resistencia eléctrica*

8 **a** Utiliza una hoja de cálculo para entrar los mismos datos sin procesar que se muestran en la Figura 1.7.
b Utiliza la hoja de cálculo para confirmar los cálculos que se muestran.
c ¿Qué diferencia aparecería en los resultados si el radio del alambre solo se pudiera medir con una precisión de medio milímetro?

Naturaleza de la ciencia

Incertidumbre

«Todo conocimiento científico presenta un cierto grado de incertidumbre...»

Richard P. Feynman (1998), *¿Qué significa todo eso?: Reflexiones de un científico-ciudadano*

No solo son los experimentos los que presentan incertidumbre. Todo conocimiento científico la posee en un determinado grado, en el sentido de que los buenos científicos comprenden que aquello que damos por cierto hoy puede cambiar a la luz de nuevos descubrimientos o perspectivas. Y esta duda es fundamental para la verdadera naturaleza de la ciencia. En cualquier época, pasada o presente, el desarrollo de la ciencia se ha sustentado sobre un corpus de conocimiento consensuado por la comunidad científica, y los mayores avances provienen justamente de aquellos que cuestionan y ponen en duda la situación actual del conocimiento y el pensamiento científico.

Representación gráfica de la incertidumbre

Los sistemas de representación gráfica se explican detalladamente en el apartado *Gráficos y análisis de datos* de la página web gratuita anexa.

El intervalo de incertidumbre aleatoria de una medida o de un resultado calculado puede representarse gráficamente mediante unas cruces que representan cada dato experimental o calculado (en lugar de un punto).

Barras de error

En la Figura 1.8 se muestra un ejemplo, la gráfica de la distancia en función del tiempo para el movimiento de un tren. Sobre cada dato se dibuja una línea vertical y otra horizontal que representan la incertidumbre en las medidas de ambos ejes, respectivamente. En este ejemplo concreto, la incertidumbre en el tiempo es ± 0,5 s y la incertidumbre en la distancia es ± 1 m. Estas líneas, que normalmente se representan con una pequeña línea perpendicular en el extremo, para indicarlo claramente, se denominan **barras de error** (tal vez sería mejor denominarlas barras de *incertidumbre*). En la Figura 1.8, el área delimitada por cada barra de error se ha sombreado para destacarla. Cabe esperar que la curva de ajuste pase por alguno de los puntos de cada una de las áreas sombreadas.

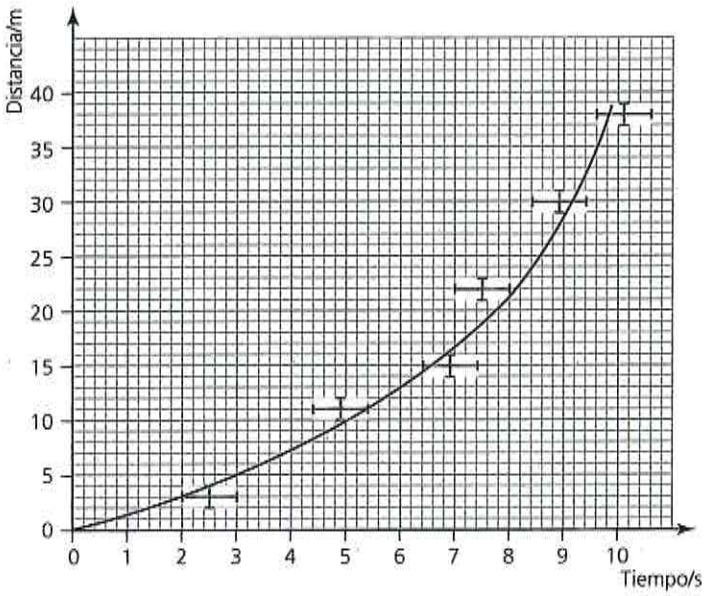


Figura 1.8 *Representación de la incertidumbre mediante barras de error*

En algunos experimentos, las barras de error son tan cortas e insignificantes que no se incluyen en la gráfica. Por ejemplo, la medida de una masa puede expresarse como 347,46 ± 0,01 g. La incertidumbre asociada a esta lectura sería demasiado pequeña para representarla en forma de barra de error sobre un gráfico. (Fíjate en que no cabe esperar barras de error para las funciones trigonométricas y logarítmicas).

Incertidumbre asociada a la pendiente y a las intersecciones con los ejes

Si los resultados de un experimento sugieren una representación lineal, normalmente es importante determinar los valores de la pendiente y/o las intersecciones con los ejes. Sin embargo, a menudo se pueden dibujar diversas rectas que pasan por las barras de error que representan los datos experimentales.

Generalmente consideramos que la recta de ajuste está entre la recta de máxima pendiente posible y la recta de mínima pendiente posible. En la Figura 1.9 se muestra un ejemplo (por simplicidad, solo se representan la primera y la última barra de error, pero en la práctica deben considerarse todas las barras de error para dibujar las rectas).

En la Figura 1.9 se representa la variación de la longitud de un muelle metálico en función de la fuerza con la que se estira. Sabemos que las medidas no son precisas porque las barras de error son largas. La recta de ajuste se ha dibujado entre las otras dos rectas. Se trata de un **gráfico lineal** (una línea recta) y sabemos que la pendiente de la recta representa la fuerza constante (rigidez) del muelle, y la intersección con el eje x representa la longitud original del muelle. A partir de las medidas procedentes de la recta de ajuste, podemos efectuar los cálculos siguientes:

$$\text{fuerza constante= gradiente} = \frac{90 - 0}{6{,}6 - 1{,}9} = 19\,\text{N cm}^{-1}$$

longitud original = intersección con el eje x = 1,9 cm

Para determinar la incertidumbre en el cálculo de la pendiente y de las intersecciones con los ejes, debemos considerar el conjunto de rectas que atraviesan las barras de error. La incertidumbre será la máxima diferencia entre los valores obtenidos a partir de las gráficas con la mayor pendiente posible y la menor pendiente posible, respectivamente, y el valor calculado a partir de la recta de ajuste. En este ejemplo se haría de la forma siguiente:

la fuerza constante está entre $14\,\text{N cm}^{-1}$ y $28\,\text{N cm}^{-1}$

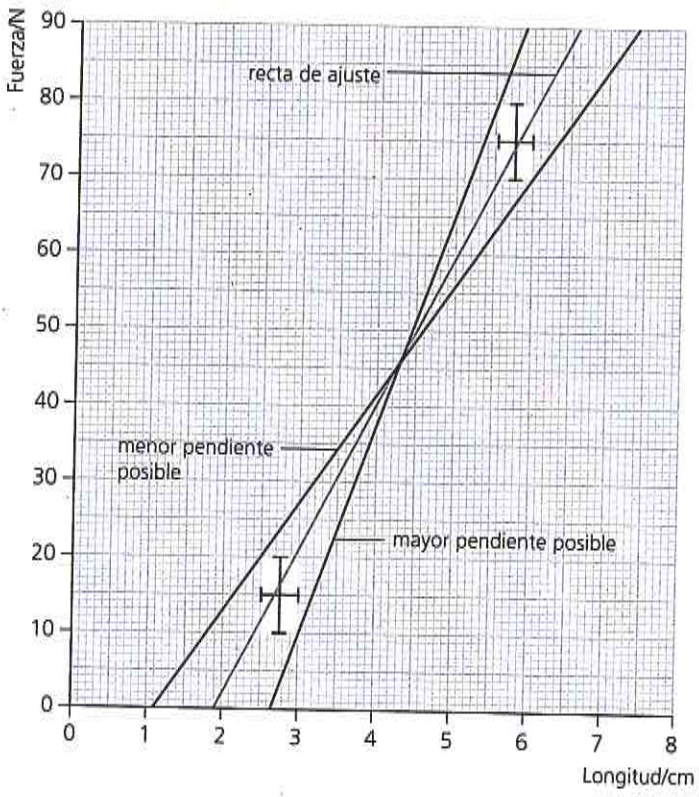
la longitud original está entre 1,1 cm y 2,6 cm.

El resultado final se puede representar como:

fuerza constante = $19 \pm 9\,\text{N cm}^{-1}$

longitud original = $1{,}9 \pm 0{,}8$ cm.

Claramente, el elevado valor de las incertidumbres asociadas a estos resultados confirma que el experimento tenía poca precisión.



■ **Figura 1.9** *Búsqueda de las pendientes máxima y mínima en el experimento del estiramiento de un muelle*

1.3 Magnitudes vectoriales y escalares

Algunas magnitudes poseen dirección y módulo, mientras que otras solo poseen módulo; comprenderlo es fundamental para su correcta manipulación

uraleza de la ciencia

Modelos tridimensionales

Al estudiar las páginas de un libro o una pantalla, es fácil que perdamos la conciencia espacial y el reconocimiento de que los principios de la ciencia se aplican al espacio tridimensional. Es importante conocer las direcciones de algunas magnitudes físicas (en dos o en tres dimensiones) para comprender sus efectos. Estas magnitudes se denominan vectores. El tratamiento matemático de las magnitudes vectoriales en tres dimensiones (análisis vectorial) se inició en el siglo dieciocho.

Magnitudes vectoriales y escalares

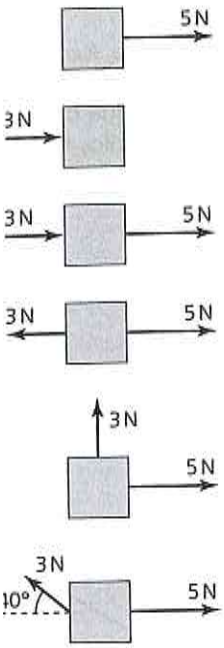


Figura 1.10
s fuerzas son agnitudes vectoriales

En los diagramas de la Figura 1.10 se representa la fuerza o fuerzas que actúan sobre un objeto. En la Figura 1.10a el objeto está siendo estirado hacia la derecha con una fuerza de 5 N. La longitud de la flecha representa su tamaño, y la orientación de la flecha representa la dirección en la que actúa. La longitud de la flecha es proporcional a la fuerza. En la Figura 1.10b se representa una fuerza más pequeña (3 N) que empuja el objeto hacia la derecha. En ambos ejemplos el objeto se desplazará (se acelerará) hacia la derecha.

En la Figura 1.10c hay dos fuerzas actuando. Podemos sumarlas para mostrar que el efecto es el mismo que el que correspondería a una única fuerza de 8 N (= 3 + 5) actuando sobre el objeto. Decimos entonces que la fuerza *resultante* (neta) es de 8 N.

En la Figura 1.10d hay dos fuerzas actuando sobre el objeto, pero lo hacen en direcciones distintas. El efecto global lo podemos calcular «sumando» las dos fuerzas, pero en este caso debemos tener en cuenta su dirección. Así, podemos escribir +5 + (–3) = + 2 N, donde a las fuerzas que tiran hacia la derecha les otorgamos signo positivo y a las que lo hacen hacia la izquierda, negativo. La resultante tiene el mismo efecto que una única fuerza (2 N) tirando hacia la derecha. En las Figuras 1.10e y 1.10f también hay dos fuerzas actuando, pero no lo hacen sobre la misma recta. En estos casos, la resultante puede determinarse mediante un compás o mediante cálculos trigonométricos (véase página 16).

Así, una fuerza es una magnitud de la que necesitamos conocer su *dirección* y su *módulo* (tamaño).

Las magnitudes que poseen tanto módulo como dirección se denominan **vectoriales**.

Todo lo que medimos posee un módulo y una unidad. Por ejemplo, podemos medir la masa de un libro, que resulta ser 640 g. Aquí, 640 g es el módulo de la medida, pero la masa no tiene dirección.

Las magnitudes que solo poseen módulo, pero no así dirección, se denominan **escalares**.

La mayoría de las magnitudes son escalares. Algunos ejemplos habituales de magnitudes escalares utilizados en física son la masa, la longitud, el tiempo, la energía, la temperatura y la velocidad. Sin embargo, cuando utilizamos las magnitudes siguientes necesitamos conocer tanto el módulo como la dirección sobre la que están actuando, ya que son *magnitudes vectoriales:*

- desplazamiento (distancia en una dirección dada)
- velocidad (rapidez en una dirección dada)
- fuerza (incluyendo el peso)
- aceleración
- momento e impulso
- intensidad del campo (gravitatorio, eléctrico y magnético).

Los símbolos de las magnitudes vectoriales se suelen representar con letra cursiva y en negrita (por ejemplo ***F***). Para las magnitudes escalares se suele emplear la cursiva normal (por ejemplo, *m*).

En los diagramas, todos los vectores se representan con flechas que apuntan hacia el sentido correcto y con una longitud que es proporcional al módulo del vector (como en las fuerzas de la Figura 1.11). A lo largo de este curso los cálculos vectoriales se limitarán a dos dimensiones.

La importancia de los vectores puede ilustrarse mediante la diferencia entre distancia y desplazamiento. El piloto de un vuelo internacional que conecta Estambul con El Cairo, por poner un ejemplo, necesita saber algo más aparte de que ambas ciudades están separadas por 1 234 km. El piloto necesita conocer el «rumbo» (la dirección) de vuelo para llegar al destino.

Análogamente, en estudios topográficos o de agrimensura deben medirse *tanto* la distancia *como* la dirección de una determinada posición respecto a un punto de referencia.

Combinación y descomposición de vectores

Suma de vectores para determinar el vector resultante

Cuando sumamos dos o más magnitudes escalares (por ejemplo, una masa de 25 g con otra de 50 g), hay una única respuesta posible (resultante): 75 g. Pero, cuando sumamos cantidades vectoriales, existe una gama de resultantes posibles, dependiendo de las direcciones con las que se trabaje.

Para determinar la resultante de las dos fuerzas que se representan en las Figuras 1.10e o 1.10f existen dos métodos posibles: el dibujo (método gráfico) o la trigonometría (método trigonométrico).

Método gráfico

Las dos fuerzas de la Figura 1.10f se dibujan cuidadosamente a escala (por ejemplo, 1 cm representando 1 N) respetando el ángulo que forman (140°). A continuación se completa el paralelogramo. La resultante es la diagonal del paralelogramo (véase Figura 1.11). Recordemos que debemos determinar tanto el módulo como la dirección a partir del diagrama. En este ejemplo, la fuerza resultante se representa mediante la línea roja. Su longitud es de 3,4 cm (es decir, 3,4 N) y forma un ángulo de 36° respecto a la fuerza de 5,0 N.

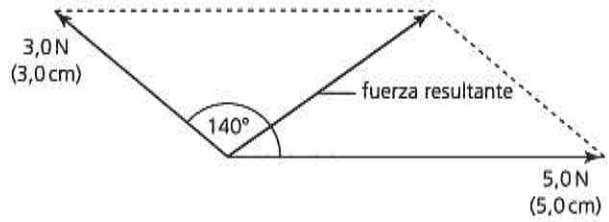


Figura 1.11
Uso del paralelogramo para la determinación de la fuerza resultante

Método trigonométrico

Las fuerzas de la Figura 1.11 forman un ángulo recto. Esto significa que el paralelogramo obtenido será un rectángulo (Figura 1.12) y el módulo de la resultante de las fuerzas, F, se puede calcular mediante el teorema de Pitágoras:

$$F^2 = 3{,}0^2 + 5{,}0^2 = 3$$

$$F = 5{,}8\,\text{N}$$

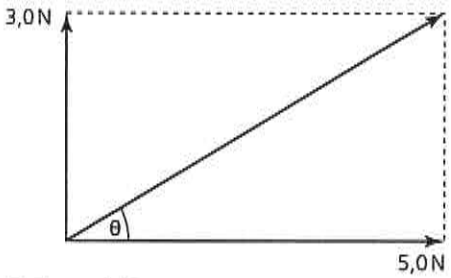


Figura 1.12

La dirección de esta fuerza puede determinarse mediante el uso de la trigonometría:

$$\text{tg}\,\theta = \frac{3{,}0}{5{,}0}$$ (θ es el ángulo que forma la resultante con la dirección de la fuerza de 5,0 N)

$$\theta = 31°$$

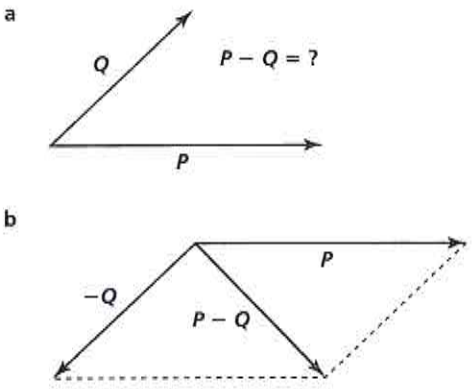
En este curso *no* se espera que determines las soluciones trigonométricas si el paralelogramo no es un rectángulo.

Resta de vectores para determinar su diferencia

Cuando deseamos conocer cuánto ha cambiado una magnitud vectorial, puede que tengamos que calcular la diferencia entre dos vectores. Dicha diferencia se determina *restando* un vector del otro. Un vector negativo posee el mismo módulo y dirección que el vector positivo, pero sentido contrario. Así, cuando restamos los vectores $\boldsymbol{P}$ y $\boldsymbol{Q}$ podemos escribir:

$$\boldsymbol{P} - \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{P} + (-\boldsymbol{Q})$$

En la Figura 1.13 se representa una resta de vectores mediante el método gráfico. La línea roja representa la diferencia cuando un determinado vector cambia en magnitud y dirección de **P** a **Q**.



■ **Figura 1.13** *Si deseamos calcular la diferencia entre P y Q (diagrama* a*) sumamos P y − Q (diagrama* b*)*

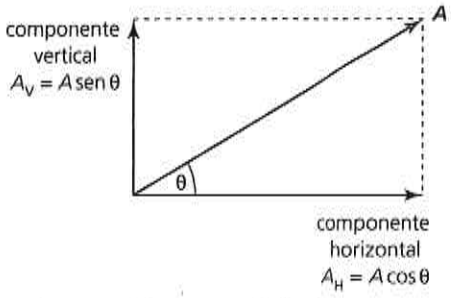
Multiplicación y división de vectores por escalares

Si un vector **P** se multiplica o se divide por un número escalar *k*, los vectores resultantes son simplemente *k***P** o ***P***/*k*. Si *k* es negativo, el vector resultante se convierte en negativo, lo que significa que cambia de sentido respecto al vector **P**.

■ Descomposición de un vector en dos componentes

Hemos visto anteriormente que dos vectores individuales pueden combinarse matemáticamente para encontrar un solo vector resultante que tenga el mismo efecto que los dos vectores considerados por separado. Este proceso puede hacerse al revés: puede considerarse que un vector individual tiene el mismo efecto que dos vectores por separado. A este proceso se le denomina **descomposición** de un vector en sus dos **componentes**. Descomponer puede ser muy útil porque, si las dos componentes se escogen de modo que sean perpendiculares entre sí (normalmente horizontal y vertical), serán independientes una de la otra y se podrán considerar totalmente por separado.

En la Figura 1.14 se representa un vector individual, **A**, con la horizontal. Si queremos conocer el efecto de este vector sobre las dos direcciones, horizontal y vertical, podemos descomponerlo en sus dos componentes:



■ **Figura 1.14** *Descomposición de un vector en dos componentes perpendiculares*

$$\cos \theta = \frac{A_H}{A}$$

y

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{A_V}{A}$$

de forma que

$$A_H = A \cos \theta$$

y

$$A_V = A \operatorname{sen} \theta$$

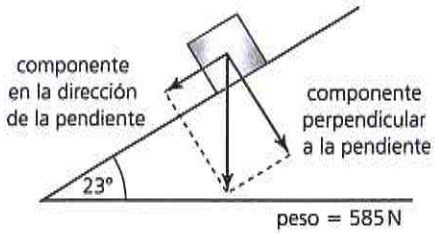
Ambas ecuaciones y el diagrama asociado figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

6 En la Figura 1.15 se representa una caja situada sobre una superficie en pendiente (un «plano inclinado»). La caja pesa 585 N. ¿Cuáles son las componentes del peso:
a en la dirección de la pendiente?
b perpendicularmente a la pendiente?

a componente en la dirección de la pendiente = 585 sen 23° = 230 N

b componente perpendicular a la pendiente = 585 cos 23° = 540 N



■ **Figura 1.15**

Enlace con la teoría del conocimiento

Física y matemáticas

¿Cuál es la naturaleza de la certidumbre y la demostración en matemáticas?

La ciencia se basa principalmente en el conocimiento obtenido a partir de la experimentación y la medida, aunque en este capítulo ha quedado claro que hablar de exactitud y certidumbre absolutas en la recogida de datos no es posible. Por el contrario, las teorías y métodos esenciales de las matemáticas puras lidian con la certidumbre. Las matemáticas son una herramienta indispensable para la física por muchas razones, entre las cuales figuran la concisión, la falta de ambigüedad y la utilidad para el establecimiento de predicciones. Los principios físicos más importantes pueden resumirse en forma matemática.

Selección de preguntas de examen

Hoja 1 preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 Se ha medido en tres ocasiones el diámetro de un alambre con un instrumento que tiene un error de compensación de cero. Los resultados han sido respectivamente: 1,24 mm; 1,26 mm y 1,25 mm. El valor medio de estos resultados es:

A. exacto pero no preciso
B. preciso pero no exacto
C. exacto y preciso
D. inexacto e impreciso.

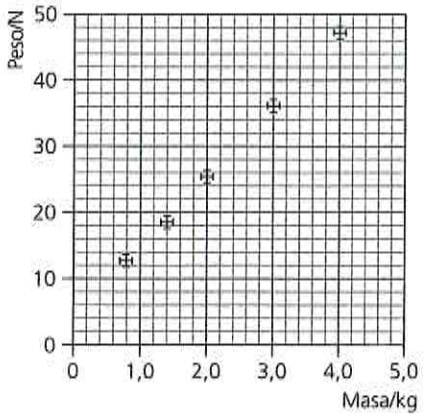
2 El espesor aproximado de una hoja de un libro de texto es:

A. 0,02 mm
B. 0,08 mm
C. 0,30 mm
D. 1,00 mm.

3 ¿Cuál de las respuestas siguientes representa la conversión aproximada de un periodo de tiempo de 1 mes a las unidades del SI?

A. 0,08 años
B. 30 días
C. 3×10^6 segundos
D. todas las anteriores.

4 Se miden de forma independiente las masas y los pesos de diferentes objetos. En el gráfico siguiente se representa el peso en función de la masa y se incluyen las barras de error.



Los resultados experimentales sugieren que:

A. las medidas muestran un error sistemático significativo y un error aleatorio pequeño
B. las medidas muestran un error aleatorio y un error sistemático pequeño
C. las medidas son precisas pero no exactas
D. el peso de un objeto es proporcional a su masa.

5 ¿Cuál de las unidades siguientes es una unidad del SI?

A. newton
B. culombio
C. amperio
D. joule

6 Se mide la distancia recorrida por un coche en un determinado periodo de tiempo con una incertidumbre del 6%. Si la incertidumbre en la medida del tiempo es del 2%, ¿cuál es la incertidumbre en el cálculo de la velocidad del coche?

A. 3%
B. 4%
C. 8%
D. 12%

7 ¿Cuál de las magnitudes siguientes es un escalar?

A. presión
B. aceleración
C. intensidad del campo gravitatorio
D. desplazamiento.

8 Se mide la intensidad de corriente de un reóstato y resulta ser 2,00 A ± 0,02A. ¿Cuál de las posibilidades siguientes identifica correctamente la incertidumbre absoluta y la incertidumbre en porcentaje de la corriente?

	Incertidumbre absoluta	Incertidumbre en porcentaje
A	± 0,02 A	± 1%
B	± 0,01 A	± 0,5%
C	± 0,02 A	± 0,01%
D	± 0,01 A	± 0,005%

© IB Organization

9 ¿Cuál de los valores siguientes representa una estimación razonable de la magnitud de la masa de un avión de gran tamaño?

A. 10^3 kg
B. 10^5 kg
C. 10^7 kg
D. 10^9 kg

10 ¿Cuál de las expresiones siguientes equivale a la unidad de la fuerza en el SI (el newton)?

A. kg m s^{-1}
B. kg m^2 s^{-1}
C. kg m s^{-2}
D. kg m^2 s^2

© IB Organization

2 Mecánica

IDEAS FUNDAMENTALES

- El movimiento se puede describir y analizar usando gráficas y ecuaciones.
- En física clásica se necesita la acción de una fuerza para cambiar un estado de movimiento, tal como sugiere Newton en sus leyes del movimiento.
- El concepto fundamental de energía es la piedra angular sobre la que se construye la ciencia.
- La conservación del momento es un ejemplo de ley inviolable.

2.1 Movimiento

El movimiento se puede describir y analizar usando gráficas y ecuaciones

La **cinemática** es el estudio de los objetos en movimiento. Los conceptos de física clásica que se presentan en este capítulo pueden aplicarse al movimiento de todas las masas, desde las más pequeñas (partículas atómicas que se mueven libremente) hasta las más grandes (estrellas).

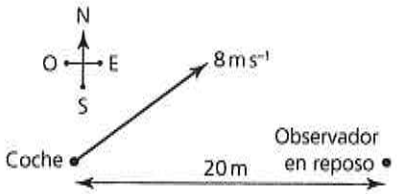


Figura 2.1
Descripción de la posición y el movimiento de un coche

Para describir completamente el movimiento de un objeto en un momento dado necesitamos decir dónde se encuentra, con qué rapidez se desplaza y en qué dirección. Por ejemplo, podemos observar que un coche se encuentra a 20 m hacia el oeste del observador y que se desplaza hacia el nordeste a una velocidad de 8 m s^{-1} (véase Figura 2.1).

No hace falta decir que alguna de estas cantidades o todas ellas pueden estar cambiando. En la vida real, el movimiento de un conjunto de objetos que están a su vez en movimiento puede ser complejo; de hecho, no acostumbran a moverse en línea recta, sino que pueden girar o incluso diversas partes pueden moverse en distintas direcciones.

En este capítulo intentaremos comprender los principios básicos de la cinemática mediante el estudio de objetos simples que se desplazan en línea recta, y los cálculos se limitarán a objetos que presentan un movimiento regular. Consideraremos los efectos de la resistencia del aire en apartados posteriores del capítulo.

Naturaleza de la ciencia

Todo se mueve

El estudio del movimiento debe ser necesariamente un pilar de la ciencia, porque *todo* se mueve. Las estrellas y las galaxias se alejan unas de otras a velocidades enormes, la Tierra describe órbitas alrededor del Sol y todo lo que hay sobre la Tierra gira alrededor de su eje una vez cada día. Los átomos y las moléculas están en constante movimiento, como también lo están las partículas subatómicas que hay en su interior. Por supuesto que en la vida diaria muchos objetos parecen estar parados, pero es solo porque los comparamos con su entorno. Si quisiéramos imaginar que un objeto estuviera absolutamente quieto, *no* en movimiento, no tendríamos manera de comprobarlo, porque todo movimiento lo es con respecto a algo.

Distancia y desplazamiento

El **desplazamiento** se define como la distancia en una dirección dada desde un punto de referencia fijado.

El desplazamiento de un objeto es su posición en comparación con un punto de referencia conocido. Por ejemplo, el desplazamiento del coche de la Figura 2.1 es de 20 m hacia el oeste del observador. Para especificar un desplazamiento necesitamos dar una distancia y una dirección desde el punto de referencia. Dicho punto se suele omitir porque es obvio: por ejemplo, podemos decir simplemente que un aeropuerto se encuentra a 50 km hacia el norte. Aunque un desplazamiento se puede producir en tres dimensiones, en este tema normalmente nos limitaremos a pensar que se produce en una o como máximo en dos dimensiones.

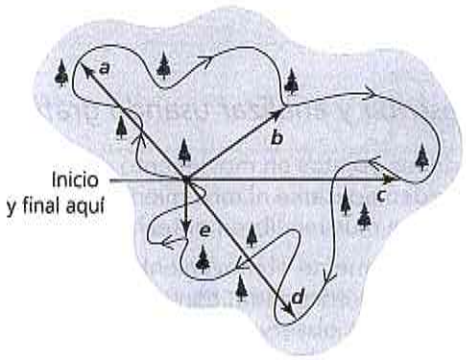
Utilizaremos el símbolo *e* tanto para el desplazamiento como para la distancia. El símbolo para la velocidad será *v*. El símbolo *h* se utiliza generalmente para distancias verticales (alturas). La

unidad del SI para la distancia es el metro, m, aunque frecuentemente se emplean también otras unidades, como el mm, el cm y el km.

Para especificar el desplazamiento necesitamos dar tanto su magnitud (tamaño) como su dirección, por tanto el desplazamiento es una magnitud **vectorial**. La distancia, en cambio, es una magnitud **escalar**, porque posee módulo pero no dirección.

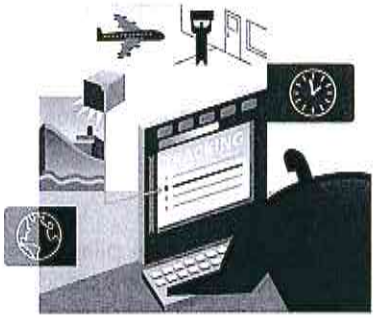
La ruta de varias personas que pasean por un parque se muestra en la Figura 2.2. La *distancia* total recorrida es de 4 km, pero el desplazamiento desde el punto de referencia es variable y se muestra cada pocos minutos mediante las flechas **(a–e)**. El *desplazamiento* final es cero, porque los paseantes han vuelto a su punto de partida.

■ **Figura 2.2**
Paseo por el parque



El transporte de vehículos, bienes y personas alrededor del mundo es un gran negocio que está supervisado y controlado por muchos países y compañías internacionales. Se requieren métodos precisos de seguimiento de la localización y el desplazamiento de un gran número de vehículos (barcos, aviones, etc.), así como rapidez en la comunicación de esta información entre los distintos países.

■ **Figura 2.3**
Seguimiento del transporte



■ Rapidez y velocidad

La **rapidez** se define como la tasa de cambio de la distancia respecto al tiempo.

La rapidez es una magnitud escalar y se representa mediante el símbolo *v*. Su unidad en el SI son los metros por segundo, m s^{-1}.

La rapidez se calcula:

$$\text{rapidez} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{tiempo que se ha tardado en recorrerla}}$$

Utilizamos el símbolo Δ cuando deseamos representar un (pequeño) cambio en algo, por tanto podemos definir la rapidez mediante símbolos de la manera siguiente:

$$v = \frac{\Delta e}{\Delta t}$$

Si un objeto se mueve con rapidez constante, determinar el valor de dicha rapidez es un cálculo sencillo. Sin embargo, la rapidez de un objeto frecuentemente cambia a lo largo del tiempo durante el cual lo observamos, de modo que el valor calculado es un **valor medio de la rapidez** durante

ese intervalo de tiempo. Por ejemplo, si un coche recorre una distancia de 120 km en 1,5 h, su rapidez media es de 80 $km\,h^{-1}$, pero su rapidez real habrá variado con seguridad a lo largo del trayecto. Podemos consultar en cualquier momento el velocímetro del coche para ver la **rapidez instantánea**, es decir, la rapidez en un determinado *instante*. En cinemática nos suelen interesar más los valores instantáneos de la rapidez (y de la velocidad y de la aceleración) que los valores medios.

La rapidez media se calcula sobre un intervalo de tiempo que sea lo suficientemente largo como para que la velocidad real haya cambiado. Los valores instantáneos deben calcularse a partir de medidas realizadas sobre intervalos muy cortos de tiempo (de modo que podamos asumir que durante este tiempo la rapidez ha sido constante).

La rapidez se calcula utilizando la distancia recorrida durante el tiempo que se está considerando, con independencia de la dirección del movimiento. Si los paseantes de la Figura 2.2 están 2 horas paseando por el parque, su rapidez media será $\Delta e/\Delta t$ (= 4/2) = $2\,km\,h^{-1}$.

Aplicaciones

Horarios de viaje

Los horarios del Ghan, un tren que viaja a través de Australia entre Adelaide y Darwin, con un tendido ferroviario de 2979 km de vías, se muestran en la Figura 2.4:

Adelaide – Alice Springs – Katherine – Darwin		
	Durante todo el año	**Servicios adicionales desde junio a agosto**
	Domingo	*Miércoles*
Salida desde Adelaide	12.20 p.m.	12.20 p.m.
	Lunes	*Jueves*
Llegada a Alice Springs	1.45 p.m.	1.45 p.m.
Salida de Alice Springs	6.00 p.m.	6.00 p.m.
	Martes	*Viernes*
Llegada a Katherine	9.00 a.m.	9.00 a.m.
Salida de Katherine	1.00 p.m.	1.00 p.m.
Llegada a Darwin	5.30 p.m.	5.30 p.m.

■ **Figura 2.4** *Horario del tren Ghan*

1 **a** Calcula el tiempo de trayecto y a partir del resultado la rapidez media.
b ¿Por qué es confusa tu respuesta al apartado **a**?

Normalmente nos interesa no solo la rapidez con la que se mueve un objeto, sino también la dirección de movimiento. Si damos la rapidez y la dirección, entonces la magnitud se denomina *velocidad*.

La **velocidad** se define como la tasa de cambio del desplazamiento respecto al tiempo (rapidez en una dirección dada):

$$v = \frac{\Delta e}{\Delta t}$$

Fíjate en que el símbolo Δ en esta ecuación se refiere al desplazamiento y no a la distancia global. (Para evitar confusiones, suele ser mejor definir la rapidez y la velocidad con palabras en lugar de símbolos).

La velocidad se representa con el mismo símbolo y tiene la misma unidad que la rapidez, pero debe darse también la dirección, ya que la velocidad es una magnitud vectorial. Sin embargo, si la dirección de movimiento no cambia, no es infrecuente referirse a la velocidad como rapidez; por ejemplo, decimos que una velocidad es de 4 $m\,s^{-1}$, porque la dirección se sobreentiende a partir del contexto.

Volviendo al ejemplo de los paseantes del parque, al final del paseo su rapidez media ha sido de 2 $km\,h^{-1}$, pero su velocidad media ha sido cero, porque el desplazamiento final ha sido cero. Sin embargo, no se trata de una información demasiado útil; es más probable que nos interese conocer la **velocidad instantánea** en varios instantes de tiempo durante el paseo.

Cuando la velocidad (o rapidez) de un objeto cambia a lo largo de un intervalo de tiempo, utilizamos el símbolo u para la *velocidad inicial* y el símbolo v para la *velocidad final* durante dicho intervalo. Estas velocidades no corresponden exactamente a las velocidades al inicio y al final del movimiento global, sino que corresponden simplemente a las velocidades al inicio y al final del periodo de tiempo considerado.

La distancia recorrida en un tiempo t puede determinarse mediante la ecuación:

distancia = rapidez media x tiempo

Para un objeto con aceleración *constante*:

$$\text{rapidez media} = \frac{1}{2}(\text{rapidez inicial} + \text{rapidez final})$$

Por ejemplo, si un coche acelera uniformemente desde 12 m s^{-1} hasta 16 m s^{-1}, su rapidez media durante este periodo de tiempo es de 14 m s^{-1}.

Mediante símbolos, puede expresarse como:

$$e = \left(\frac{v + u}{2}\right) t$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Registro de datos en los estudios de movimiento

La utilización de sensores de movimiento y de registradores de datos (véase Figura 2.5), detectores ópticos, temporizadores electrónicos y procedimientos de videograbación facilita algunos tipos de estudios de movimiento, haciéndolos más interesantes, más fáciles y más precisos.

■ **Figura 2.5** *Utilización de un detector de movimiento*

■ Aceleración

Cualquier variación del movimiento rectilíneo a velocidad constante se describe como una *aceleración*. Es muy importante comprender que ir más rápido, más lento y/o cambiar de dirección son distintas formas de aceleración (cambio de velocidad).

La **aceleración**, a, se define como la tasa de cambio de la velocidad respecto al tiempo:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - u}{t} \quad \text{(si la aceleración es constante respecto al tiempo } \Delta t\text{)}$$

La unidad del SI para la aceleración son los metros por segundo al cuadrado, m s^{-2} (las mismas unidades de la velocidad/tiempo, m s^{-1}/s). La aceleración es una magnitud vectorial.

La aceleración puede ser:

- un aumento de la velocidad (aceleración positiva)
- una disminución de la velocidad (aceleración negativa – a veces se denomina *deceleración*)
- un cambio de dirección.

Perspectivas adicionales

Tiempos de reacción cuando cronometramos movimientos

El tiempo que transcurre entre que algo ocurre y la respuesta mediante algún tipo de acción se denomina *tiempo de reacción*. El valor habitual suele ser de 0,20 s, pero puede variar de forma considerable en función de las condiciones asociadas. Una manera simple de medir el tiempo de reacción de una persona es midiendo la distancia que recorre una regla entre que se deja caer y se agarra con el pulgar y el índice. El tiempo puede calcularse mediante la ecuación $e = 5t^2$.

La medida puede repetirse vendando los ojos de la persona, con el objeto de comprobar si el tiempo de reacción cambia en función de si el estímulo (agarrar la regla) es sonoro o táctil en lugar de visual. Sea cual sea el tipo de prueba, nuestros tiempos de reacción son, con toda probabilidad, inconsistentes. Esto último significa que siempre que utilicemos cronómetros manuales, los resultados presentarán una incertidumbre inevitable (véase Capítulo 1). Lo más sensato es realizar medidas de tiempo lo más largas posibles para disminuir la importancia de este problema. (Así se reduce el porcentaje de incertidumbre). El efecto de los errores aleatorios también se puede reducir repitiendo las medidas y calculando el valor medio.

1 Utiliza el método descrito arriba (o cualquier otro) para medir tu tiempo de reacción cuando el estímulo es la vista. Repite la medida 10 veces.

a ¿Cuál ha sido el porcentaje de variación entre tu resultado medio y tu tiempo de reacción más rápido?

b ¿Mejora tu tiempo de reacción con la práctica?

Gráficas para describir el movimiento

Se pueden dibujar gráficas que representan cualquier tipo de movimiento y que proporcionan una comprensión adicional y una perspectiva (con solo una mirada) que difícilmente se pueden obtener a partir de las descripciones o las ecuaciones por escrito. Además, los gradientes de las curvas y las áreas bajo las curvas a menudo proporcionan una valiosa información adicional.

Gráficas desplazamiento–tiempo y gráficas distancia–tiempo

La figura 2.6 muestra la variación del desplazamiento de un objeto respecto a un punto de referencia en función del tiempo. Todos los ejemplos que aparecen en la Figura 2.6 son líneas rectas y puede decirse que representan **relaciones lineales**.

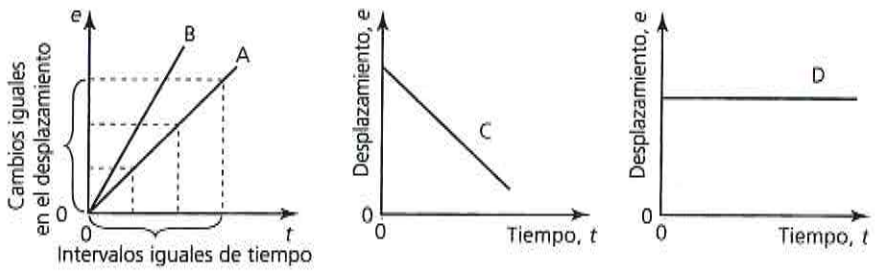


Figura 2.6
Velocidades constantes en gráficas de desplazamiento-tiempo (gráficas e-t)

- La recta A representa un objeto que se aleja de un punto de referencia de manera que a un mismo intervalo de tiempo le corresponde un mismo desplazamiento. Es decir, el objeto viaja a velocidad constante. Toda gráfica desplazamiento–tiempo lineal representa una velocidad constante (no tiene por qué empezar o acabar en el origen).
- La recta B representa un objeto que viaja a mayor velocidad que el objeto de la recta A.
- La recta C representa un objeto que se mueve cerca del punto de referencia.
- La recta D representa un objeto parado (en reposo). Tiene velocidad cero y se mantiene a la misma distancia del punto de referencia.

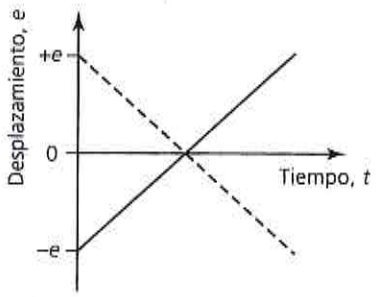
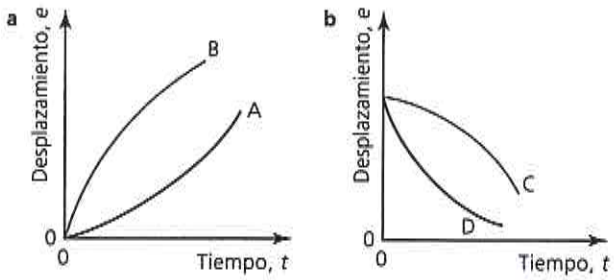


Figura 2.7
Movimiento en sentidos opuestos representado en una gráfica desplazamiento-tiempo

El desplazamiento es una magnitud vectorial, pero las gráficas desplazamiento–tiempo como las de las figuras anteriores se utilizan normalmente en situaciones donde el movimiento se produce en una dirección conocida, de modo que no hace falta expresarla de nuevo. El desplazamiento en sentidos opuestos se representa usando valores positivos y negativos. Esto último se muestra en la Figura 2.7, en la que la línea sólida representa el movimiento de un objeto que se desplaza a veloci-

dad constante (positiva). El objeto se mueve hacia un punto de referencia (donde el desplazamiento es cero), llega a este y a continuación se aleja en sentido opuesto con la misma velocidad. La línea de puntos representa una rapidez idéntica en sentido contrario (o también podría representar el movimiento original si los sentidos definidos como positivo y negativo se intercambiaran).

Toda línea curva (no lineal) en una gráfica desplazamiento–tiempo representa una velocidad variable; en otras palabras, una aceleración (o deceleración). Esto último se ilustra en la Figura 2.8.



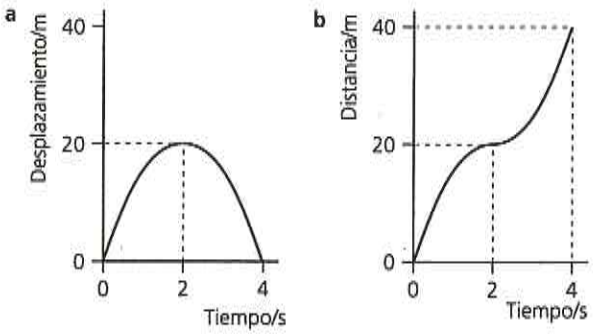
■ **Figura 2.8**
Aceleraciones en gráficas desplazamiento-tiempo

El movimiento de *alejamiento* respecto al punto de referencia se representa en la Figura 2.8a. La curva A representa un objeto que acelera. La curva B representa un objeto que decelera (aceleración negativa).

El movimiento de *acercamiento* hacia el punto de referencia se representa en la Figura 2.8b. La curva C representa un objeto que acelera. La curva D representa un objeto que decelera (aceleración negativa).

Los valores de la aceleración representados en estas gráficas pueden ser constantes o no (no puede determinarse sin un análisis más detallado).

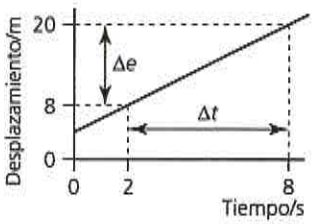
En física normalmente interesan más las gráficas desplazamiento–tiempo que las gráficas distancia–tiempo. Para explicar la diferencia, consideremos la Figura 2.9. La gráfica desplazamiento–tiempo para un objeto lanzado verticalmente hacia arriba con una rapidez inicial de 20 m s^{-1}, sin resistencia del aire, se muestra en la Figura 2.9a. El objeto tarda 2 s en alcanzar la altura máxima de 20 m. En ese punto su velocidad instantánea es cero, antes de volver al punto de donde partió al cabo de 4 s y volver a ganar su velocidad inicial. El mismo movimiento en una gráfica general distancia–tiempo se muestra en la Figura 2.9b.



■ **Figura 2.9**
Gráficas desplazamiento-tiempo y distancia-tiempo para un objeto que se mueve primero hacia arriba y después hacia abajo

Gradientes de las gráficas de desplazamiento–tiempo

Consideremos el movimiento a velocidad constante que se representa en la Figura 2.10.



■ **Figura 2.10**
Cómo calcular una velocidad constante a partir de una gráfica desplazamiento-tiempo

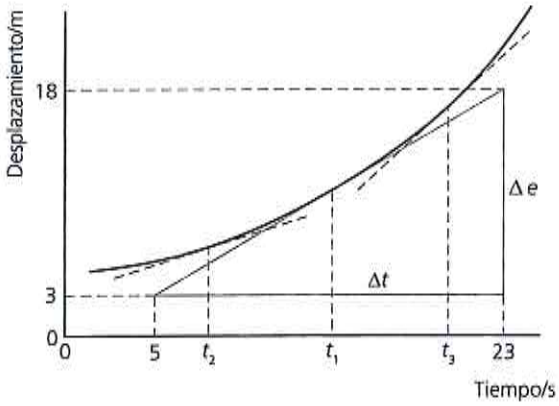
A partir de la gráfica, la velocidad *v* viene dada por:

$$v = \frac{\Delta e}{\Delta t} = \frac{20 - 8{,}0}{8{,}0 - 2{,}0} = 2{,}0\,\text{m}\,\text{s}^{-1}$$

Fíjate que la velocidad tiene el mismo valor numérico que el gradiente (pendiente) de la curva. Esto último siempre es cierto, con independencia de la forma de la curva.

La **velocidad instantánea** de un objeto es igual al gradiente de la curva de desplazamiento–tiempo en ese instante.

El movimiento de un objeto que se mueve con velocidad cada vez mayor se representa en la Figura 2.11. La velocidad en cada instante de tiempo (por ejemplo t_1) puede determinarse mediante el cálculo del gradiente (la pendiente) de la recta tangente a la curva en ese instante.



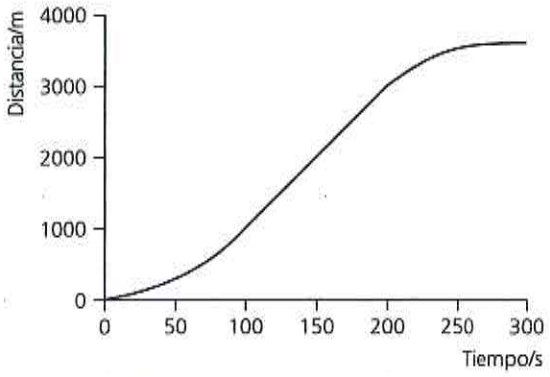
■ **Figura 2.11** *Determinación de la velocidad instantánea a partir de la curva de una gráfica desplazamiento-tiempo*

El triángulo utilizado debe ser grande con el objetivo de que este proceso sea lo más preciso posible. La tangente correspondiente al instante t_2 tiene un menor gradiente (pendiente) porque la velocidad es menor. En el instante t_3 la velocidad es mayor y el gradiente (pendiente) es más escarpado. Así, en este ejemplo:

$$\text{velocidad en } t_1 = \frac{18 - 3{,}0}{23 - 5{,}0} = \frac{15}{18} = 0{,}83\,\text{m s}^{-1}$$

1 El movimiento de un tren que viaja por una vía recta entre dos estaciones se representa en la Figura 2.12.

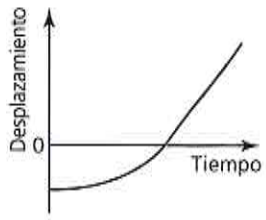
   a Describe el movimiento.
   b ¿A qué distancia se encuentran las dos estaciones?
   c Calcula la velocidad máxima que ha alcanzado el tren.
   d ¿Cuál ha sido la rapidez media del tren entre las dos estaciones?



■ **Figura 2.12**

2 a Dibuja una gráfica desplazamiento–tiempo para un nadador que nada 50 m a una rapidez constante de 1,0 m s^{-1} si la piscina tiene 25 m de longitud y el nadador tarda 1 s en darse la vuelta para completar la carrera.
   b Averigua la rapidez media del campeón mundial de estilo libre cuando se batió por última vez el récord de los 100 m.
   c El récord mundial de natación para 50 m en una piscina de 25 m de longitud es más rápido que para una piscina de 50 m. Explica por qué.

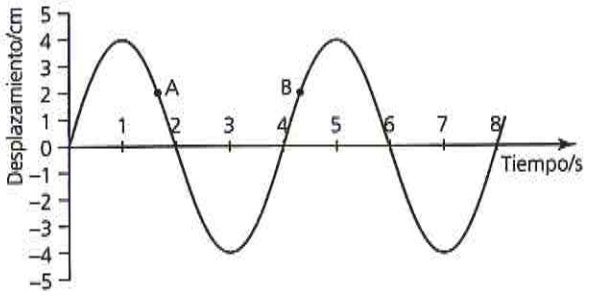
3 Dibuja una gráfica desplazamiento–tiempo para el movimiento siguiente: un coche parado se encuentra a 25 m; al cabo de 2 s empieza a moverse alejándose en línea recta de ti con una aceleración constante de 1,5 m s^{-2} durante 4 s; después continúa a velocidad constante durante otros 8 s.



■ **Figura 2.13**

4 Describe el movimiento del corredor representado en la gráfica de la Figura 2.13.

5 a Describe el movimiento representado por la gráfica de la Figura 2.14.

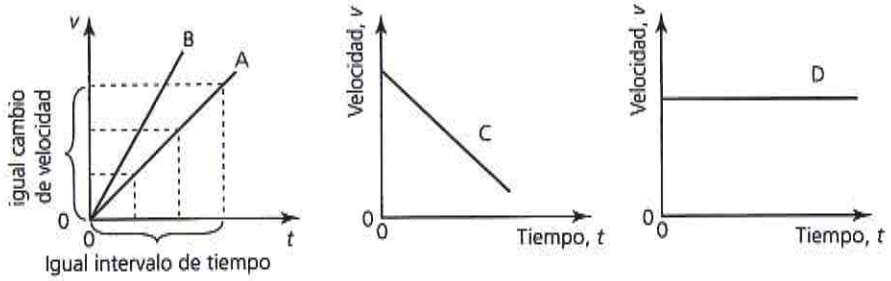


■ **Figura 2.14**

b Compara las velocidades en los puntos A y B.
c ¿Cuándo se mueve el objeto con velocidad máxima y con velocidad mínima?
d Estima los valores de las velocidades máxima y mínima.
e Sugiere qué tipo de objetos podrían moverse de este modo.

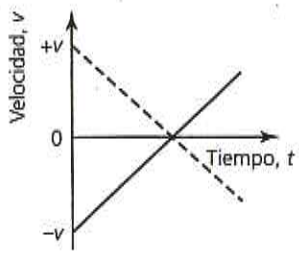
Gráficas velocidad–tiempo

En toda gráfica velocidad–tiempo, como las que se muestran en la Figura 2.15, se representa la variación de la velocidad de un objeto respecto al tiempo. Toda línea recta en una gráfica velocidad–tiempo indica que para un mismo intervalo de tiempo se produce un mismo cambio de velocidad, es decir, una aceleración constante.



■ **Figura 2.15**
Aceleración constante en gráficas velocidad-tiempo

- La recta A representa un objeto que tiene una aceleración positiva constante.
- La recta B representa un objeto que se mueve con una aceleración positiva mayor que la del objeto de la recta A.
- La recta C representa un objeto que está decelerando (aceleración negativa).
- La recta D representa un objeto que se mueve a velocidad constante, es decir, con aceleración cero.

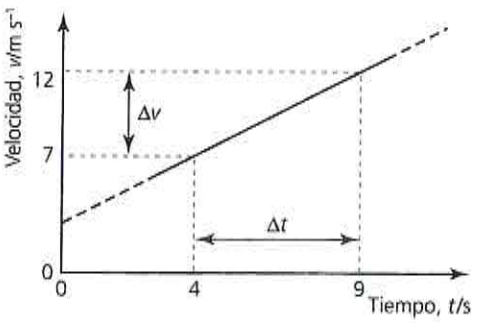


■ **Figura 2.16**
Velocidades en sentidos contrarios

Las líneas curvas en las gráficas velocidad–tiempo representan aceleraciones variables. Las velocidades en sentidos opuestos se representan mediante valores positivos y negativos. La línea sólida de la Figura 2.16 representa un objeto que decelera uniformemente hasta velocidad cero y después se mueve en sentido contrario con una aceleración del mismo módulo. Esta gráfica podría representar el movimiento de una piedra lanzada al aire que alcanza su máxima altura para caer de nuevo a continuación. La aceleración permanece constante (9,81 m s^{-2} hacia abajo). En este ejemplo, a la velocidad y a la aceleración hacia arriba se les ha otorgado signo negativo, de manera que la velocidad y la aceleración hacia abajo son positivas. La línea discontinua representa el mismo movimiento si se eligen el sentido positivo y negativo al revés.

Gradientes de las gráficas velocidad–tiempo

Consideremos el movimiento a aceleración constante que se muestra en la Figura 2.17.



■ **Figura 2.17**
Determinación del gradiente de una gráfica velocidad-tiempo

A partir de la gráfica:

$$\text{aceleración, } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{12 - 7{,}0}{9{,}0 - 4{,}0} = 1{,}0\,\text{m s}^{-2}$$

Observa que la aceleración tiene el mismo valor numérico que el gradiente (la pendiente) de la curva. Esto es siempre cierto, con independencia de la forma de la curva.

La **aceleración instantánea** de un objeto es igual al gradiente de la gráfica velocidad-tiempo en ese instante.

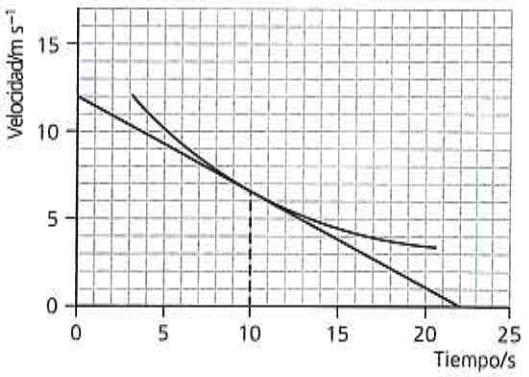
Ejemplo resuelto

1 La curva de color rojo de la Figura 2.18 muestra un objeto que está decelerando (con una aceleración negativa que va disminuyendo). Utiliza la gráfica para determinar la aceleración instantánea en el instante de tiempo 10 s.

Podemos utilizar la tangente a la curva en el instante de tiempo 10 s para determinar el valor de la aceleración en ese instante:

$$\text{aceleración, } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0 - 12}{22 - 0} = -0{,}55\,\text{m s}^{-2}$$

En este ejemplo, el triángulo de gran tamaño que se ha utilizado para determinar el gradiente con precisión se ha dibujado extendiendo la tangente hacia los ejes por comodidad.



■ **Figura 2.18**
Determinación de la aceleración instantánea a partir de una gráfica velocidad-tiempo

Áreas bajo las curvas velocidad–tiempo

Consideremos de nuevo el movimiento representado en la Figura 2.17. El cambio en el desplazamiento, e, entre los segundos cuarto y noveno podemos determinarlo a partir de (velocidad media) × tiempo.

$$e = \frac{12 + 7{,}0}{2} \times (9{,}0 - 4{,}0) = 48\,\text{m}$$

Este valor numérico coincide con el del área bajo la curva entre $t = 4{,}0\,\text{s}$ y $t = 9{,}0\,\text{s}$ (y que corresponde al área sombreada de la Figura 2.17). Esto último siempre es cierto, con independencia de la forma de la curva.

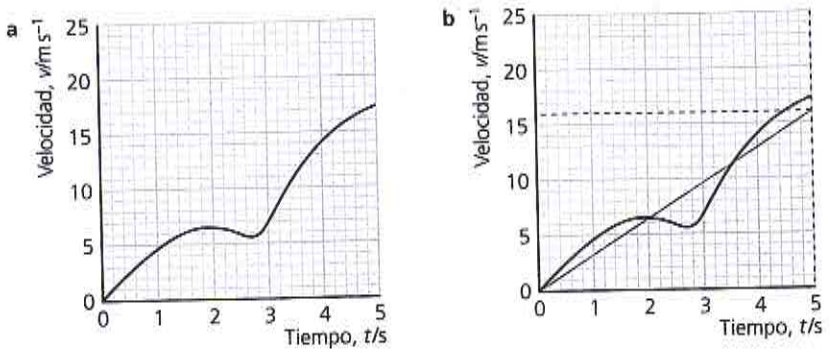
El área bajo una curva velocidad–tiempo es igual al cambio de desplazamiento en el tiempo dado.

Ejemplo resuelto

2 El cambio en la velocidad de un coche durante los 5 s posteriores al inicio del movimiento se muestra en la Figura 2.19a. Utiliza la gráfica para estimar la distancia recorrida durante este periodo de tiempo.

La recta de color azul de la Figura 2.19b se ha dibujado de forma que el área encerrada bajo esta recta equivalga al área encerrada bajo la curva original (a ojo).

$$\text{distancia} = \text{área bajo la curva} = \frac{1}{2} \times 16 \times 5{,}0 = 40\,\text{m}$$

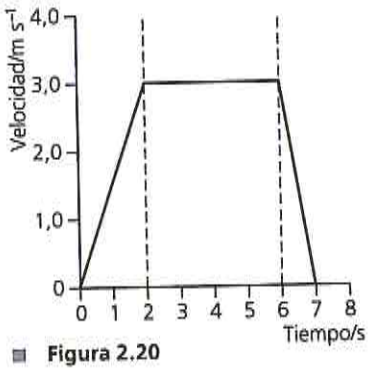


■ **Figura 2.19** *Determinación del desplazamiento de un coche durante la aceleración*

6 a Describe el movimiento representado mediante la gráfica de la Figura 2.20.
b Calcula la aceleración para las tres partes del trayecto.
c ¿Cuál es la distancia total recorrida?
d ¿Cuál es la rapidez media?

7 Determinamos la velocidad de un coche mediante la lectura del velocímetro en el momento en que inicia el movimiento y cada dos segundos a partir de entonces.

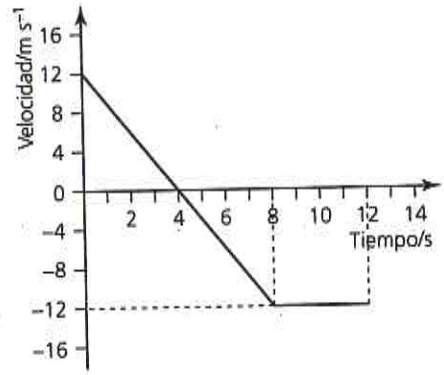
Los valores sucesivos ($m\,s^{-1}$) son: 0; 1,1; 2,4; 6,9; 12,2; 18,0; 19,9; 21,3 y 21,9. Representa gráficamente estas lecturas y utiliza la gráfica para determinar la aceleración máxima y la distancia recorrida en 16 s.



■ **Figura 2.20**

8 a Describe el movimiento del objeto que se representa mediante la gráfica de la Figura 2.21.
b Calcula la aceleración durante los primeros 8 s.
c ¿Cuál es la distancia total recorrida en 12 s?
d ¿Cuál es el desplazamiento total al cabo de 12 s?
e ¿Cuál es la rapidez media durante el intervalo de 12 s?

9 Dibuja esquemáticamente una gráfica velocidad–tiempo para el movimiento siguiente: un coche viaja a una velocidad constante de $25\,m\,s^{-1}$ por una carretera recta hacia ti y se encuentra a 200 m de ti. Dos segundos después de pasar por delante de ti, el conductor decelera uniformemente y el coche se para a 62,5 m de ti.



■ **Figura 2.21**

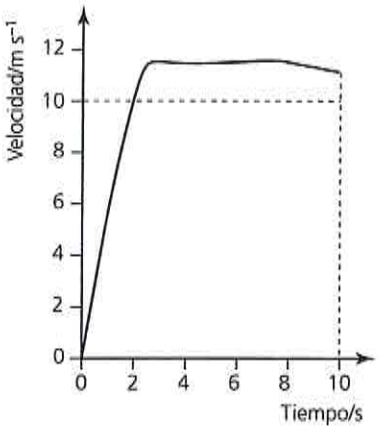
Aplicaciones

Biomecánica y velocistas de 100 m lisos

Los velocistas de categoría mundial pueden recorrer 100 m lisos en unos 10 s (véase Figura 2.22). La velocidad media es fácil de calcular: $v = 100/10 = 10\,m\,s^{-1}$. Evidentemente, parten de $0\,m\,s^{-1}$, de manera que su velocidad instantánea máxima debe ser mayor de $10\,m\,s^{-1}$.

Los entrenadores emplean la ciencia denominada *biomecánica* para perfeccionar las técnicas de los atletas y utilizan asimismo los métodos informáticos más novedosos para analizar cada momento de la carrera. La aceleración a partir de los bloques de salida es extremadamente importante, ya que interesa alcanzar la máxima velocidad tan pronto como sea posible. Durante el resto de la carrera, el atleta debe ser capaz de mantener la misma velocidad, aunque puede producirse un cierto descenso hacia el final de la carrera. En la Figura 2.23 se muestra una gráfica velocidad–tiempo típica para una carrera de 100 m lisos, completada en 10 s.

■ **Figura 2.22**
Usain Bolt batió el récord mundial de los 100 m lisos con un tiempo de 9,58 s en Berlín en el año 2009



■ **Figura 2.23**
Gráfica velocidad–tiempo para un atleta que corre los 100 m lisos

1 a Estima la mayor aceleración alcanzada durante la carrera que se ilustra en la Figura 2.23.

b ¿Cuándo alcanza el atleta su mayor velocidad?

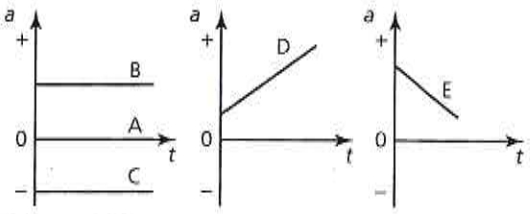
c Explica por qué son iguales las dos áreas sombreadas de la gráfica.

d Dibuja una gráfica donde se represente la variación del récord mundial (u olímpico) de los 100 m lisos a lo largo de los últimos 100 años. Utiliza Internet para encontrar los datos necesarios.

e Predice el récord de los 100 m lisos para el año 2040.

Gráficas aceleración–tiempo

En una gráfica aceleración–tiempo (*a*–*t*), como la que se muestra en la Figura 2.24, se representa la variación de la aceleración de un objeto respecto al tiempo. En este capítulo nos interesan más las aceleraciones constantes (las gráficas de movimiento con aceleración variable son menos frecuentes). En las gráficas de la Figura 2.24 se muestran cinco rectas que representan aceleraciones constantes.



■ **Figura 2.24**
Gráficas de aceleración constante

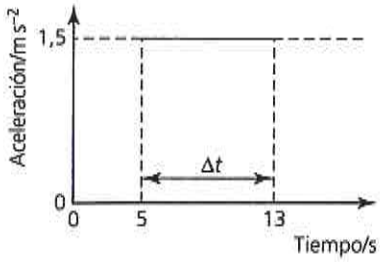
- La recta A indica aceleración cero, velocidad constante.
- La recta B indica una aceleración positiva constante (velocidad que aumenta uniformemente).
- La recta C muestra la aceleración negativa constante (deceleración) de un objeto que disminuye su velocidad a una tasa constante.
- La recta D muestra una aceleración positiva en aumento (linealmente).
- La línea E muestra un objeto que está acelerando positivamente aunque a una tasa (linealmente) decreciente.

Áreas bajo las gráficas aceleración–tiempo

La aceleración constante de un coche en movimiento se muestra en la Figura 2.25. Utilizando la ecuación $a = \Delta v/\Delta t$, entre los segundos 5 y 13, la velocidad del coche aumenta en:

$$\Delta v = a\Delta t = 1{,}5 \times 8{,}0 = 12\,\text{m s}^{-1}$$

El cambio en la velocidad tiene el mismo valor numérico que el área encerrada bajo la curva entre $t = 5\,\text{s}$ y $t = 13\,\text{s}$ (área sombreada de la Figura 2.25). Esto es siempre cierto, con independencia de la forma de la curva.



■ **Figura 2.25** *Cálculo del cambio de velocidad a partir de una gráfica aceleración-tiempo*

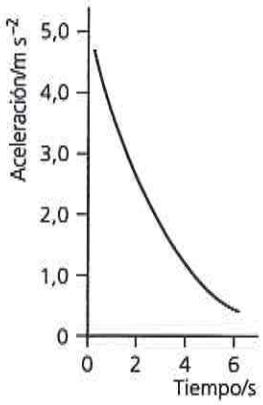
El área encerrada bajo una gráfica aceleración-tiempo es igual al cambio de la velocidad en el periodo de tiempo dado.

10 Dibuja una gráfica aceleración-tiempo para un coche que parte del reposo, acelera a $2\,\text{m s}^{-2}$ en 5 s, a continuación viaja a velocidad constante durante 8 s y después decelera uniformemente durante 2 s más hasta quedar de nuevo en reposo.

11 La variación de la aceleración de un coche durante un intervalo de tiempo de 6 s se representa en la Figura 2.26. Si el coche viaja a $2\,\text{m s}^{-1}$ al cabo de 1 s, estima un área adecuada bajo la curva y utilízala para determinar la rapidez aproximada del coche al cabo de 5 s.

12 En la Figura 2.27 se muestra una pelota de tenis en el momento de ser golpeada por una raqueta. Dibuja esquemáticamente una posible gráfica velocidad-tiempo y una gráfica aceleración-tiempo para un intervalo de tiempo que vaya desde 1 s antes del impacto hasta 1 s después del impacto.

13 Dibuja esquemáticamente una posible gráfica desplazamiento-tiempo y una gráfica velocidad-tiempo para una pelota que rebota y que se lanza desde un estado de reposo. Continúa el esquema hasta la tercera vez que la pelota rebota contra el suelo.

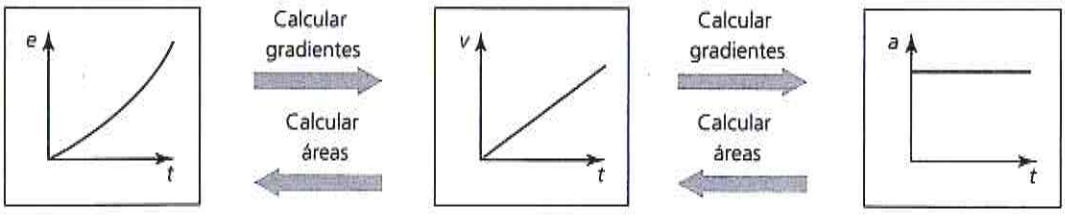


■ **Figura 2.26**

■ **Figura 2.27** *Impacto de una pelota de tenis contra una raqueta*

Gráficas de movimiento: resumen

Si se dispone de una cualquiera de las gráficas de movimiento (*e*–*t*, *v*–*t* o *a*–*t*), el movimiento queda totalmente definido y se pueden dibujar las otras dos gráficas a partir de la información sobre los gradientes y/o las áreas correspondientes a la primera gráfica. Esto último se resume en la Figura 2.28.



■ **Figura 2.28** *Conexiones entre las diferentes gráficas de movimiento*

Reproducir a mano una de las gráficas a partir de otra es un proceso largo y repetitivo, ya que para obtener gráficas precisas hay que realizar un gran número de medidas y cálculos similares sobre periodos cortos de tiempo. Los ordenadores son, por descontado, ideales para este propósito.

Si se poseen conocimientos avanzados de matemáticas, que no forman parte de este curso, se puede utilizar el *cálculo infinitesimal* para llevar a cabo estos procesos mediante la derivación y la integración.

Aplicaciones

Ecuaciones cinemáticas: distancias de frenado

En la Figura 2.29 se representa la variación de las velocidades de dos coches idénticos desde el momento en que sus conductores se percatan de un peligro enfrente de ellos e intentan detener sus coches lo más rápidamente posible. Suponemos que ambos conductores tienen el mismo tiempo de reacción (0,7 s) y que ambos coches deceleran con una misma tasa (–5,0 m s^{-2}).

La distancia recorrida a velocidad constante antes de que el conductor reaccione y pise el pedal del freno se conoce como «distancia de reacción». La distancia recorrida mientras el coche decelera se denomina «distancia de frenado». La distancia total de detención es la suma de ambas distancias.

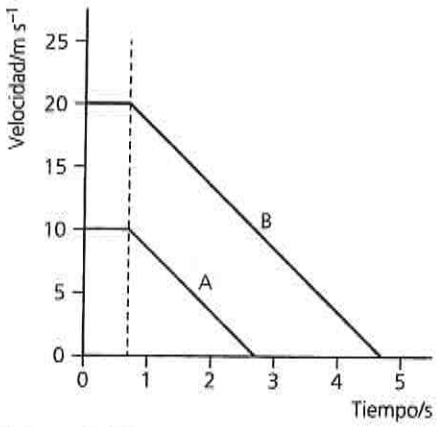


Figura 2.29
Gráficas velocidad–tiempo para dos coches que frenan

Al coche B, que viaja al doble de la velocidad del coche A, le corresponde el doble de la distancia de reacción. Es decir, la distancia de reacción es proporcional a la velocidad del coche. La distancia recorrida cuando se frena, sin embargo, es proporcional al *cuadrado* de la velocidad. Esto último se puede confirmar a partir de las áreas encerradas bajo las gráficas *v*–*t*. El área encerrada bajo la gráfica B es cuatro veces el área encerrada bajo la gráfica A (durante la deceleración). Este hecho tiene importantes consecuencias en la seguridad vial y, en la mayoría de países, la variación de la distancia de detención respecto a la velocidad del vehículo es objeto de estudio en las escuelas de conducción. En algunos países, los candidatos a la obtención del permiso de conducir deben pasar una prueba en la que se mide su tiempo de reacción.

Elabora una hoja de cálculo para calcular la distancia total de detención para coches que viajan a una rapidez inicial, *u*, entre 0 y 40 m s^{-1} con una deceleración de –6,5 m s^{-2}. (Haz cálculos cada 2 m s^{-1}). La distancia de reacción se puede calcular a partir de $e_r = 0{,}7\ u$ (tiempo de reacción 0,7 s). En este ejemplo el tiempo de frenado se puede calcular a partir de $t_f = u/6{,}5$ y la distancia de frenado se puede calcular a partir de $e_f = (u/2)\ t_f$. Emplea los datos calculados para generar una gráfica creada por ordenador en la que se represente la distancia de detención (eje *y*) respecto a la rapidez inicial (eje *x*).

Ecuaciones de movimiento en caso de aceleración uniforme

Las cinco cantidades *u*, *v*, *a*, *e* y *t* son todo lo que necesitamos para describir completamente el movimiento de un objeto que se mueve con aceleración uniforme (constante).

- *u* = velocidad (rapidez) al inicio del tiempo *t*
- *v* = velocidad (rapidez) al final del tiempo *t*
- *a* = aceleración (constante)
- e = distancia recorrida en el tiempo *t*
- *t* = tiempo que tarda la velocidad (rapidez) en pasar del valor *u* al valor *v* y recorrer una distancia *e*

Si se conocen tres de las cantidades anteriores, las otras dos se pueden calcular mediante las dos ecuaciones que se indican debajo. Si conocemos la velocidad inicial *u* y la aceleración *a* de un objeto, y la aceleración es uniforme, entonces podemos determinar su velocidad final *v* al cabo de un tiempo *t* reorganizando la ecuación utilizada para definir la aceleración. El resultado es:

$$v = u + at$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

También hemos visto que la distancia recorrida cuando se acelera uniformemente desde una velocidad *u* hasta una velocidad *v* en un tiempo *t* se puede calcular a partir de:

$$e = \frac{(v + u)t}{2}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Estas dos ecuaciones se pueden combinar matemáticamente para obtener dos ecuaciones más que se muestran a continuación y que también figuran en *Apéndice de datos de Física*. Estas útiles ecuaciones no comportan más teoría física, sino que simplemente expresan los mismos principios físicos de diferente modo.

$$v^2 = u^2 + 2ae$$

$$e = ut + \frac{1}{2}at^2$$

Recuerda que las cuatro ecuaciones de movimiento solo se pueden utilizar si la aceleración es uniforme durante el tiempo considerado.

Las ecuaciones del movimiento también se tratan en el curso de Matemáticas IB (también se desarrollan utilizando el cálculo infinitesimal).

Ejemplos resueltos

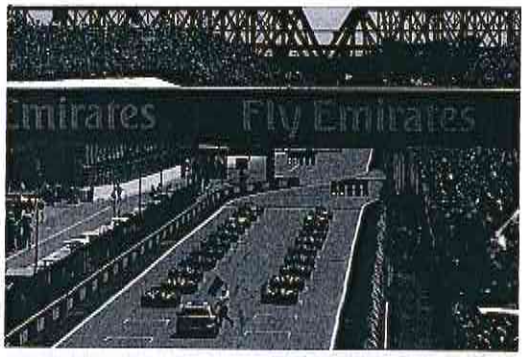
3 Un coche de carreras de Fórmula 1 (véase Figura 2.30) acelera *desde el estado de reposo* (es decir, al principio estaba parado) hasta 18 m s^{-2}.

a ¿Cuál es su rapidez al cabo de 3 s?

b ¿Cuánto espacio ha recorrido hasta este momento?

c Si continúa acelerando al mismo ritmo, ¿cuál será su velocidad cuando haya recorrido 200 m desde el estado de reposo?

d Convierte la velocidad final a km h^{-1}.



■ **Figura 2.30** *Los coches de Fórmula 1 están listos para comenzar el Gran Premio de Canadá*

a $v = u + at$

$v = 0 + (18 \times 3{,}0)$

$v = 54\,\text{m s}^{-1}$

b $e = \frac{v + u}{2} t$

$e = \frac{0 + 54}{2} \times 3{,}0$

$e = 81\,\text{m}$

Pero hay que tener en cuenta que la distancia se puede calcular directamente, sin calcular primero la velocidad final, de la manera siguiente:

$e = ut + \frac{1}{2}at^2$

$e = (0 \times 3{,}0) + (0{,}5 \times 18 \times 3{,}0^2)$

$e = 81\,\text{m}$

c $v^2 = u^2 + 2ae$

$v^2 = 0^2 + (2 \times 18 \times 200)$

$v^2 = 7200$

$v = 85\,\text{m s}^{-1}$

d $85\,\text{m s}^{-1} = 85 \times 3600 = 3{,}1 \times 10^5\,\text{m h}^{-1}$

$3{,}1 \times 10^5\,\text{m h}^{-1} = \frac{3{,}1 \times 10^5}{10^3} = 310\,\text{km h}^{-1}$

4 Un tren que viaja a 50 m s^{-1} (180 km h^{-1}) necesita decelerar uniformemente para poder detenerse en una estación que se encuentra a 2 kilómetros.

a ¿Cuál es la deceleración necesaria?

b ¿Cuánto tarda el tren en detenerse?

a $v^2 = u^2 + 2ae$

$0^2 = 50^2 + (2 \times a \times 2000)$

$a = \frac{-50^2}{2 \times 2000}$

$a = -0{,}63\,\text{m s}^{-2}$

b $v = u + at$

$0 = 50 + (-0{,}625) \times t$

$t = \frac{50}{0{,}625} = 80\,\text{s}$

(Como forma alternativa se podría haber usado $e = \frac{u + v}{2} t$)

Supón que todas las aceleraciones son constantes.

14 Una pelota rueda por una pendiente con aceleración constante. Cuando pasa por un punto P su velocidad es $1{,}2\,m\,s^{-1}$ y al cabo de un breve periodo de tiempo pasa por el punto Q con una velocidad de $2{,}6\,m\,s^{-1}$.
   a ¿Cuál es la velocidad media entre P y Q?
   b Si tarda 1,4 s en ir de P a Q, ¿cuál es la distancia PQ?
   c ¿Cuál es la aceleración de la pelota?

15 Un avión acelera por una pista desde el estado de reposo y despega con una velocidad de $86{,}0\,m\,s^{-1}$. Su aceleración durante este tiempo es $2{,}40\,m\,s^{-2}$.
   a ¿Qué distancia recorre el avión por la pista antes de despegar?
   b ¿Cuánto tiempo transcurre entre que el avión comienza a acelerar y el despegue?

16 Un petrolero transoceánico no puede decelerar a más de $0{,}0032\,m\,s^{-2}$.
   a ¿Cuál es la mínima distancia que necesita el barco para detenerse si viaja a 10 nudos? (1 nudo = $0{,}514\,m\,s^{-1}$)
   b ¿Cuánto tiempo requiere esta deceleración?

17 En un anuncio publicitario para un nuevo coche se afirma que puede recorrer 100 m desde el estado de reposo en 8,2 s.
   a ¿Cuál es la aceleración media?
   b ¿Cuál es la velocidad del coche al cabo de este tiempo?

18 Un coche que viaja a una velocidad constante de $21\,m\,s^{-1}$ (más rápido que el límite de velocidad establecido en $50\,km\,h^{-1}$) pasa por delante de un coche de policía que está parado. El coche de policía acelera hacia el coche infractor con una aceleración de $4{,}0\,m\,s^{-2}$ durante 8 s y después continúa con la misma velocidad hasta que adelanta al coche infractor.
   a ¿Cuándo tienen ambos coches la misma velocidad?
   b ¿Ha adelantado el coche de policía al coche infractor al cabo de 10 s?
   c Determina el momento exacto en el que el coche de policía adelanta al coche infractor igualando las dos ecuaciones para la misma distancia y el mismo tiempo.

19 Un coche frena de repente y se detiene al cabo de 2,4 s, tras haber recorrido una distancia de 38 m.
   a ¿Cuál es su deceleración?
   b ¿Cuál es la velocidad del coche antes de frenar?

20 Una nave espacial que viaja a $8{,}00\,km\,s^{-1}$ acelera a $2{,}00 \times 10^{-3}\,m\,s^{-2}$ durante 100 horas.
   a ¿Cuál es la rapidez final?
   b ¿Cuánto espacio recorre durante su aceleración?

21 Combina las dos primeras ecuaciones del movimiento (se dan en la página 33) para derivar a partir de ellas las otras dos ($v^2 = u^2 + 2ae$ y $e = ut + \frac{1}{2}at^2$).

Naturaleza de la ciencia

Observaciones

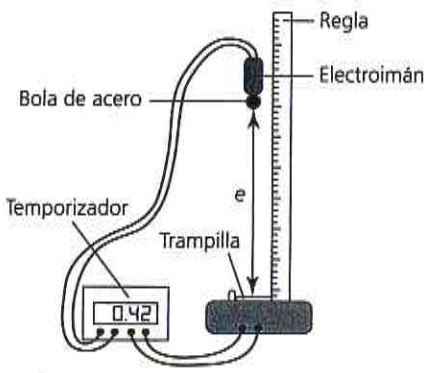
El conocimiento científico solo se ha desarrollado verdaderamente desde que se ha comprendido la importancia de los datos experimentales.

Las ecuaciones del movimiento (y las leyes del movimiento de Newton) son una parte muy importante de la física clásica que todo estudiante debe comprender bien. Se propusieron en los inicios del desarrollo histórico de la física, cuando las técnicas experimentales no estaban tan desarrolladas como lo están en la actualidad. Sin embargo, estas ideas fundamentales sobre el movimiento siguen siendo igual de importantes en el mundo moderno.

Los primeros científicos, como Galileo y Newton, llevaron a cabo observaciones cuidadosas y recogieron los suficientes datos para respaldar sus teorías sobre el movimiento ideal, a pesar de que la fricción y la resistencia del aire siempre complican el estudio de los objetos en movimiento. Esto es especialmente impresionante, porque algunas de sus teorías contradecían ideas que habían sido aceptadas durante 2000 años.

Aceleración debida a la gravedad

Todos estamos familiarizados con el movimiento de objetos que caen hacia la Tierra a causa de la fuerza de la gravedad. En la Figura 2.31 se muestra un experimento para la recogida de datos de distancias y tiempos en el caso de una masa que cae. Con estos datos se puede calcular el valor de su aceleración. El temporizador electrónico empieza a contar cuando se desconecta la corriente del electroimán y la bola de acero empieza a caer. Cuando la bola impacta con la trampilla colocada en la parte inferior, se desconecta una segunda corriente eléctrica y el temporizador se detiene. Como opción alternativa se puede utilizar un sensor para monitorizar la caída de la bola.



■ **Figura 2.31**
Experimento para medir la aceleración debida a la gravedad

Ejemplo resuelto

5 Supón que cuando la masa cae 0,84 m se mide un tiempo de 0,42 s. Calcula su aceleración gravitatoria.

$$e = ut + \frac{1}{2}at^2$$
$$0{,}84 = 0 + (0{,}5 \times a \times 0{,}42^2)$$
$$a = \frac{0{,}84}{0{,}088} = 9{,}5\,\text{m s}^{-2}$$

Ciudad	g/m s^{-2}
Auckland	9,799
Bangkok	9,783
Buenos Aires	9,797
Ciudad del Cabo	9,796
Chicago	9,803
Kuwait	9,793
Londres	9,812
La Paz	9,784
Ciudad de México	9,779
Tokio	9,798

■ **Tabla 2.1**
Valores de g en algunas ciudades del mundo

Evidentemente, para la obtención de un resultado exacto y fiable es necesario hacer más medidas. Se pueden repetir las medidas para una misma altura, de modo que se puedan calcular promedios. No obstante, sería mejor realizar medidas para diferentes alturas con el objeto de poder dibujar una gráfica, que siempre es un método mejor para evaluar errores aleatorios y sistemáticos.

Si se realizan medidas precisas en el vacío (para asegurarnos de que no hay resistencia del aire), los resultados correspondientes a todas las ubicaciones terrestres son muy similares (aunque no idénticos). Se muestran algunos ejemplos de estas medidas en la Tabla 2.1.

La **aceleración debida a la gravedad** en el vacío cerca de la superficie de la Tierra se representa con el símbolo g. También se la denomina **aceleración de caída libre**. El valor aceptado para g es 9,81 m s^{-2}. Este es el valor que debe utilizarse en los cálculos y figura en el *Apéndice de datos de Física*. Cualquier punto sobre la superficie de la Tierra (o en un avión) puede considerarse un punto «cerca de la superficie de la Tierra».

Es muy importante recordar que *todos los objetos que se mueven libremente* cerca de la superficie de la Tierra experimentan esta misma aceleración, g, hacia abajo. Esto es cierto con independencia de si el objeto es grande o pequeño, o si se está moviendo hacia arriba, hacia abajo, lateralmente o en cualquier otra dirección. «Moverse libremente» significa que se pueden ignorar los efectos de la resistencia del aire y que el objeto no está accionado de algún modo. En la realidad, sin embargo, los efectos de la resistencia del aire normalmente no se pueden ignorar, excepto en el caso de masas grandes y densas que recorren distancias cortas desde una posición de reposo. Pero, como ocurre a menudo en el caso de la ciencia, necesitamos comprender primero ejemplos simplificados antes de abordar situaciones más complejas.

Ejemplos resueltos

6 Una moneda en reposo cae por una ventana abierta y recorre 16 m hasta llegar al suelo. Suponiendo que no hay resistencia del aire:

a ¿Cuál es su velocidad cuando impacta contra el suelo?
b ¿Cuánto tarda en recorrer esta distancia?

a $v^2 = u^2 + 2ae$
$v^2 = 0^2 + (2 \times 9{,}81 \times 16) = 314$
$v = 18\,\text{m s}^{-1}$

b $v = u + at$
$18 = 0 + 9{,}81t$
$t = \frac{18}{9{,}81} = 1{,}8\,\text{s}$

7 Se lanza una bola verticalmente hacia arriba y alcanza una altura máxima de 21,4 m
a Calcula la rapidez con la que se lanza la bola.
b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?
c ¿Dónde estará la bola al cabo de 3,05 s de su lanzamiento?
d ¿Cuál será su velocidad en ese momento?

a $v^2 = u^2 + 2ae$

Cuando la bola recorra una distancia $e = 21{,}4$ m su rapidez, v, en el punto más alto será cero.

$0^2 = u^2 + (2 \times -9{,}81 \times 21{,}4)$

$u^2 = 419{,}9$

$u = 20{,}5\,\text{m s}^{-1}$

En este ejemplo, las cantidades vectoriales con sentido hacia arriba (u, v, e) se consideran positivas y la cantidad con sentido hacia abajo (a), negativa. Obtendríamos la misma respuesta si otorgáramos los signos al revés. El uso de signos positivos y negativos para representar vectores (como el desplazamiento, la velocidad y la aceleración) con sentidos opuestos es una práctica habitual.

b Se ha supuesto que no hay resistencia del aire.

c $e = ut + \frac{1}{2}at^2$
$e = (20{,}5 \times 3{,}05) + \left(\frac{1}{2} \times -9{,}81 \times 3{,}05^2\right)$
$e = 16{,}9\,\text{m}$ por encima del suelo

d $v = u + at$
$v = 20{,}5 + (-9{,}81 \times 3{,}05)$
$v = -9{,}42\,\text{m s}^{-1}$ (moviéndose hacia abajo)

En todas las preguntas siguientes, ignora los posibles efectos de la resistencia del aire. Utiliza $g = 9{,}81\,\text{m s}^{-2}$.

22 Sugiere posibles motivos por los que la aceleración debida a la gravedad no es la misma en todos los puntos de la superficie terrestre.

23 **a** ¿Cuánto tarda en alcanzar el suelo una piedra que se deja caer desde un estado de reposo a una altura de 2,1 m?
b Si lanzamos la piedra hacia el suelo con una velocidad inicial de $4{,}4\,\text{m s}^{-1}$, ¿con qué velocidad impactará contra el suelo?
c Si lanzamos la piedra verticalmente hacia arriba con una velocidad inicial de $4{,}4\,\text{m s}^{-1}$, ¿con qué velocidad impactará contra el suelo?

24 Lanzamos una roca de pequeño tamaño verticalmente hacia arriba con una velocidad inicial de $22\,\text{m s}^{-1}$. ¿Cuándo tendrá una velocidad de $10\,\text{m s}^{-1}$? (Hay dos respuestas posibles).

25 Una pelota que está cayendo tiene una velocidad de $12{,}7\,\text{m s}^{-1}$ cuando pasa por delante de una ventana que está a 4,81 m del suelo. ¿Cuándo impactará la pelota contra el suelo?

26 Lanzamos una pelota verticalmente hacia arriba con una rapidez de $18{,}5\,\text{m s}^{-1}$ desde una ventana que se encuentra a 12,5 m del suelo.
a ¿Cuándo volverá a pasar por delante de la misma ventana en su movimiento de caída?
b ¿Con qué rapidez impactará contra el suelo?
c ¿A qué distancia del suelo se encuentra la pelota al cabo de 2 s exactamente?

27 Dejamos caer dos pelotas que están en reposo desde una misma altura. Si dejamos caer la segunda pelota 0,750 s después de la primera, y suponemos que no impacta contra el suelo, ¿a qué distancia se encuentran las dos pelotas:
a al cabo de 3,00 s de haber dejado caer la segunda pelota?
b 2 s más tarde?

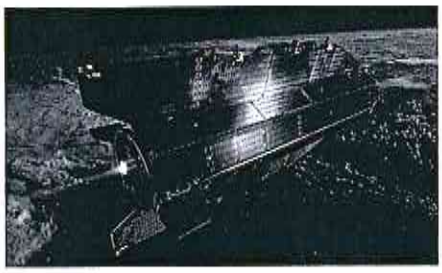
28 Se deja caer una piedra en estado de reposo desde una altura de 34 m. Se lanza otra piedra hacia abajo 0,5 s más tarde. Si ambas piedras impactan contra el suelo al mismo tiempo, ¿cuál era la velocidad inicial de la segunda piedra?

29 En el Ejemplo resuelto 3 se proponía una aceleración de 18 m s^{-2} para un coche de Fórmula 1. Se podría decir que el conductor del coche experimenta una «gravedad» de casi 2*g*, y durante el transcurso de una carrera típica el conductor puede llegar a soportar una gravedad de casi 5*g*. Explica qué es lo que entiendes por una «gravedad» de 2*g*.

30 Se deja caer una piedra A en reposo desde un acantilado. Cuando ha caído 5 m, se deja caer la piedra B.
a ¿Cómo cambia la distancia entre ambas piedras (si es que cambia) a medida que caen?
b Razona tu respuesta.

31 a Una pulga acelera al increíble promedio de 1500 m s^{-2} durante un despegue vertical que dura solo unos 0,0012 s. ¿Qué altura alcanzará la pulga?
b Mide cuánto puedes saltar verticalmente (desde el mismo sitio) y utiliza el resultado para calcular tu velocidad de despegue.
c Para saltar, has tenido que doblar las rodillas y reducir tu altura. Mide cuánto se ha reducido tu altura justo antes de saltar y a continuación utiliza el resultado para estimar tu aceleración media durante el despegue.
d ¿Cuánto ha durado tu despegue?
e Compara tus datos con los de la pulga.

32 Utiliza Internet para aprender más sobre el proyecto GOCE, que finalizó en 2013 (Figura 2.32).



■ **Figura 2.32**
El satélite Explorador del Campo Gravitatorio y de la Circulación Oceánica en estado Estacionario (GOCE por sus siglas en inglés) fue lanzado por la Agencia Espacial Europea en 2009

■ **Figura 2.33**
Edificio Burj Khalifa (en Dubai)

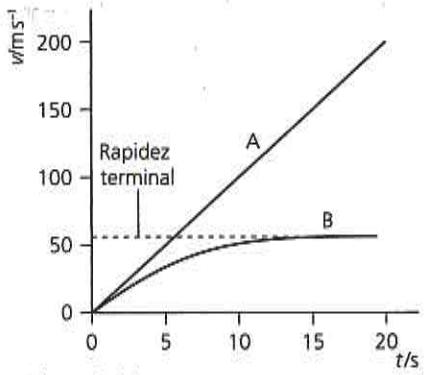
33 En la Figura 2.33 se muestra el edificio más alto del mundo, el Burj Khalifa, en Dubai.
a ¿Cuánto tardaría un objeto en impactar contra el suelo si se dejara caer desde 828 m (la altura del Burj Khalifa)?
b ¿Con qué velocidad impactaría contra el suelo?

34 Se han medido los tiempos de caída de una pelota desde distintas alturas (Figura 2.31).
a Dibuja esquemáticamente la gráfica altura–tiempo que esperarías obtener a partir de estos resultados.
b Considerando la ecuación $e = ut + \frac{1}{2}at^2$, ¿cuál es la mejor gráfica para obtener la recta de ajuste a partir de la que determinar la aceleración debida a la gravedad?

Resistencia de un fluido y velocidad terminal

Cuando un objeto se mueve a través del aire, este se ve forzado a desplazarse hacia fuera de la trayectoria del objeto. Este fenómeno provoca una fuerza que se opone al movimiento y que se denomina **resistencia del aire (resistencia aerodinámica)**.

El movimiento de un objeto que se desplaza en cualquier dirección a través de todo gas o líquido está sometido a fuerzas similares de oposición al movimiento. (Tanto los gases como los líquidos se describen como **fluidos** porque pueden **fluir**). Estas fuerzas de oposición al movimiento se suelen denominar **resistencia del fluido**.



■ **Figura 2.34**
Ejemplo de una gráfica de la velocidad respecto al tiempo para un objeto que cae por efecto de la gravedad, con resistencia del aire y sin ella

El movimiento de un objeto que cae hacia la Tierra se representa en la Figura 2.34. La recta A representa el movimiento sin resistencia del aire y la curva B muestra el movimiento teniendo en cuenta la resistencia del aire, una situación más realista.

Cuando un objeto empieza a caer no hay resistencia del aire. La aceleración inicial, *g*, es la misma que si estuviera en el vacío. A medida que aumenta la rapidez de caída del objeto, la resistencia del aire también aumenta, de manera que la tasa de incremento de la velocidad se hace menor. Este fenómeno se ilustra en la Figura 2.34 mediante la pendiente de la curva B, que se hace menos escarpada. Al final, el objeto alcanza una velocidad máxima constante que se denomina **rapidez terminal** o *velocidad terminal* («terminal» significa final). El

valor de la rapidez terminal de un objeto depende de su sección transversal, su forma y su peso, tal como se explica en la Sección 2.2. Se suele considerar que la rapidez terminal de un paracaidista está en torno a 200 km h^{-1} (56 m s^{-1}) – Figura 2.35. La rapidez terminal también depende de la densidad del aire – en octubre de 2012 el paracaidista austríaco Felix Baumgartner (Figura 2.36) estableció el récord mundial de rapidez en 1358 km h^{-1} al saltar desde una altura de unos 39 km sobre la superficie de la Tierra, donde hay muy poco aire.

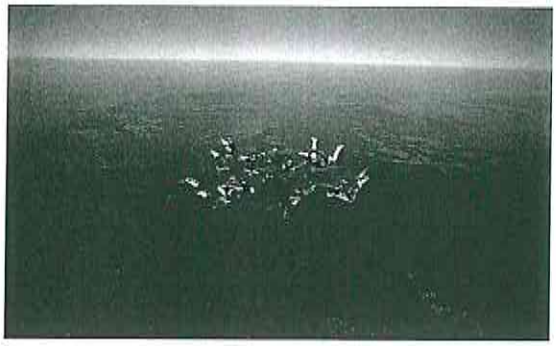


Figura 2.35
Paracaidistas en caída libre

Figura 2.36
Felix Baumgartner a punto de saltar desde una altura de 39 km

El diseño de paracaídas simples y su movimiento permiten realizar interesantes estudios, especialmente si se puede grabar en vídeo su caída cuando esta es casi vertical. El movimiento de un objeto que cae verticalmente a través de un líquido (por ejemplo petróleo) es más lento y también puede estudiarse en un laboratorio escolar. También puede alcanzar una velocidad terminal y presenta un patrón de movimiento análogo al que se muestra en la Figura 2.34. Las simulaciones por ordenador también resultan de utilidad para estimar de forma rápida cuáles son los factores que afectan a la rapidez terminal. La resistencia del aire se estudia con mayor detalle en posteriores apartados de este capítulo (página 52).

Perspectivas adicionales

Galileo

Existe un acuerdo común sobre la idea de que «los objetos más pesados caen a tierra más rápido que los objetos más ligeros». Se puede demostrar fácilmente dejando caer, por ejemplo, una pelota y una hoja de papel, una al lado de la otra. La comprensible idea de que los objetos más pesados caen más rápido constituyó un principio fundamental de la «filosofía natural» (el nombre que recibían los primeros estudios de lo que hoy día conocemos como ciencia) durante más de 2000 años de civilización. En la antigua Grecia, Aristóteles había ligado el movimiento de los objetos en caída libre con la idea de que todo proceso tiene un propósito y que la Tierra es el lugar de reposo natural y legítimo para todo.

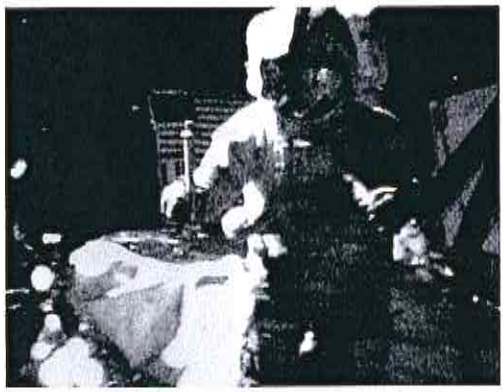
Figura 2.37
Galileo Galilei

En el siglo XVI el científico italiano Galileo (Figura 2.37) fue de los primeros en sugerir que el motivo por el que diversos objetos caen de forma distinta es únicamente la resistencia del aire. Galileo predijo que si el experimento se pudiera repetir en el vacío (sin aire), todos los objetos presentarían exactamente el mismo patrón de movimiento descendente bajo los efectos de la gravedad.

Según se cuenta en una de las anécdotas más famosas de la historia de la ciencia, Galileo dejó caer diferentes masas desde un balcón de la Torre de Pisa (Italia) para demostrar a los que observaban desde el suelo que la gravedad actúa de igual forma sobre todos los objetos que caen. Esta anécdota puede ser cierta o no, pero uno de los motivos por los que Galileo es un científico tan respetado es porque fue uno de los primeros que verdaderamente hicieron experimentos, no solo los idearon.

No fue hasta muchos años más tarde, tras la invención de las primeras bombas de vacío, cuando Isaac Newton, entre otros científicos, pudo eliminar los efectos de la resistencia del aire y demostrar que una moneda (una «guinea») y una pluma llegan al suelo a la vez.

En 1971 se repitió este famoso experimento en la Luna (Figura 2.38), cuando el astronauta David Scott dejó caer un martillo y una pluma, uno al lado de la otra. Millones de espectadores de todo el mundo observaban el experimento mientras Scott les explicaba los descubrimientos de Galileo. La fuerza de la gravedad es menor en la Luna que en la Tierra porque la Luna es más pequeña (tiene menos masa). Los objetos se aceleran hacia la Luna unas 6 veces más lentamente que hacia la Tierra (g = 1,6 m s^{-2}).



■ **Figura 2.38** *Caída libre de objetos en la Luna*

1 Los logros de Galileo se mencionaron específicamente cuando se repitió el experimento en la Luna, pero, ¿piensas que hubo otros científicos que fueron igualmente dignos de reconocimiento por su avanzada forma de comprender el movimiento y la gravedad? Cita el nombre de dos de estos pioneros de la ciencia y enumera sus grandes logros.

Naturaleza de la ciencia

¿Qué es la ciencia?

El científico italiano Galileo Galilei (1564–1642) es famoso por sus innovadores estudios sobre cinemática y caída libre de objetos, además de ser reconocido como uno de los primeros científicos *prácticos* (en el sentido moderno del término). Pero, ¿qué es exactamente la ciencia y qué es lo que la hace distinta de otras actividades humanas?

No es una pregunta fácil de responder en unas pocas palabras, aunque sí que hay algunas importantes características que comparten la mayoría de las actividades científicas:

- La ciencia intenta ver la simplicidad que subyace en la vasta complejidad que nos rodea.
- La ciencia busca los patrones lógicos y las reglas que controlan los acontecimientos.
- La ciencia busca acumular conocimiento y, siempre que sea posible, construir sobre el conocimiento existente para fabricar un marco de conocimiento ilimitado.

Y lo que es más importante, la ciencia se basa en la experimentación y en las pruebas; es decir, la ciencia se basa en los «hechos» que, en el momento presente, se aceptan como «ciertos». Un buen científico nunca proclama que algo debe ser absolutamente «cierto» siempre; de hecho, una de las principales características de la ciencia es la verificación de las teorías existentes de forma constante, generalizada e independiente a través de la experimentación. Ningún hecho ni ninguna teoría pueden demostrarse verdaderos en todo momento y lugar, porque la ciencia a menudo avanza a través de experimentos que intentan rebatir nuevas teorías o el conocimiento previamente existente.

A la pregunta «¿qué es la ciencia?» se suele responder explicando *cómo* trabajan los científicos. Es lo que se conoce como el «método científico», que se puede resumir con los pasos que se enumeran a continuación, aunque cada proceso científico en concreto puede mostrar variaciones respecto a este modelo general:

- Escoge un tema de estudio (por ejemplo, el diseño de pelotas de golf – Figura 2.39).
- Recoge la información disponible sobre el tema escogido (tal vez puedes usar Internet para encontrar información sobre el diseño de pelotas de golf).
- Formula una pregunta apropiada para tu estudio (por ejemplo, ¿viaja más lejos una pelota de golf más grande que otra más pequeña si ambas las lanzamos con el mismo golpe?).
- Utiliza la teoría para predecir lo que crees que va a ocurrir en el estudio (por ejemplo, puedes pensar que una pelota más pequeña presenta menos resistencia al aire y por tanto viajará más lejos).

■ **Figura 2.39**
¿Por qué tienen las pelotas de golf un tamaño determinado?

- Diseña un experimento para verificar tu predicción y llévalo a cabo.
- Procesa los resultados y evalúa las incertidumbres asociadas.
- Establece unas conclusiones, de modo que aceptes o rechaces tus predicciones.
- Si las conclusiones no son satisfactorias, repite el estudio o vuelve a diseñarlo.
- Si las conclusiones son satisfactorias y los resultados obtenidos se pueden repetir, preséntalos a otras personas.

35 Un antiguo proverbio chino muy conocido afirma: «Escucho y olvido, veo y recuerdo, hago y comprendo». Analiza tu conocimiento de la Física. ¿Hasta qué punto ha mejorado el trabajo experimental tu comprensión? ¿Crees que el hecho de realizar más trabajo experimental (y menos estudio teórico) mejoraría:

a tu interés?
b tus resultados de examen?

Razona tus respuestas.

Movimiento de proyectiles

Cuando hemos estudiado el movimiento de objetos a través del aire, hasta ahora solo hemos considerado el movimiento vertical ascendente o descendente. Ahora vamos a ampliar nuestra perspectiva hasta el movimiento de objetos en *cualquier* dirección. Un **proyectil** es un objeto que ha sido proyectado a través del aire (por ejemplo, disparado, lanzado de algún modo, tirado o golpeado) y que como consecuencia se desplaza únicamente bajo la acción de la fuerza de la gravedad (y la resistencia del aire, si es significativa). Un proyectil no tiene la capacidad de impulsar o de controlar su propio movimiento.

Componentes de la velocidad de un proyectil

La velocidad instantánea de un proyectil en un instante de tiempo cualquiera puede descomponerse en una componente vertical, v_V, y una componente horizontal, v_H, tal como se muestra en la Figura 2.40.

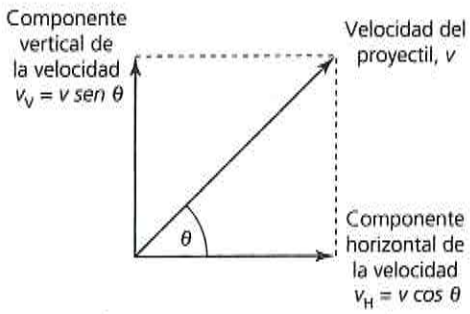


Figura 2.40 *Componente horizontal y componente vertical de la velocidad*

Como estas componentes son perpendiculares entre sí, se pueden tratar de forma independiente (separadamente) en los cálculos.

Cuando no hay resistencia del aire, todos los objetos que se mueven en el aire cerca de la superficie terrestre, bajo la acción del campo gravitatorio uniforme, se aceleran verticalmente hacia abajo con una aceleración de 9,81 m s^{-2} a causa de la fuerza de la gravedad. Esto último es cierto para *todas* las masas y para *todas* las direcciones de movimiento (incluyendo el movimiento ascendente). En otras palabras, cualquier objeto que es proyectado en cualquier ángulo *siempre* se acelera verticalmente hacia abajo con el mismo ritmo que un objeto que se deja caer verticalmente (en ausencia de resistencia del aire).

Los valores de la componente vertical de la velocidad y la velocidad resultante de un proyectil cambian continuamente durante el movimiento como consecuencia de la aceleración debida a la gravedad, pero es importante entender que la componente horizontal se mantiene constante *si* la resistencia del aire es despreciable, porque en este caso no hay fuerzas horizontales actuando sobre el proyectil.

Enlace con la teoría del conocimiento

Intuición

La independencia del movimiento horizontal y vertical en el caso del movimiento de un proyectil parece ir en contra de la intuición. ¿Cómo esquivan la intuición los científicos? ¿Cómo utilizan la intuición?

La **intuición** humana ha desempeñado un papel importante en muchos descubrimientos científicos, y en la evolución científica en general, pero los científicos también necesitan recurrir a la imaginación para proponer teorías que en ocasiones parecen ir en contra del «sentido común».

Esto último es particularmente cierto cuando intentamos comprender el extraño dominio de la física cuántica, donde basarse en las experiencias cotidianas es de poca o nula utilidad. Sin embargo, vale la pena recordar que muchos de los conceptos y teorías comúnmente aceptados de la física clásica que actualmente se enseñan en las escuelas, les habrían resultado altamente improbables a los científicos de la época en que se propusieron por primera vez.

---

36 En un momento determinado, una pelota de tenis se mueve hacia arriba con una velocidad de $28{,}4\,m\,s^{-1}$ con un ángulo de 15,7° respecto a la horizontal. Calcula la componente horizontal y la componente vertical de la velocidad.

37 Una nave espacial desciende a una velocidad constante de $480\,km\,h^{-1}$ con un ángulo de 2,0° respecto a la horizontal.
- **a** ¿Cuál es el valor de la componente vertical de la velocidad de la nave?
- **b** ¿Cuánto tardará en descender 500 m sobre su trayectoria de vuelo? (Da la respuesta con una aproximación de un minuto).

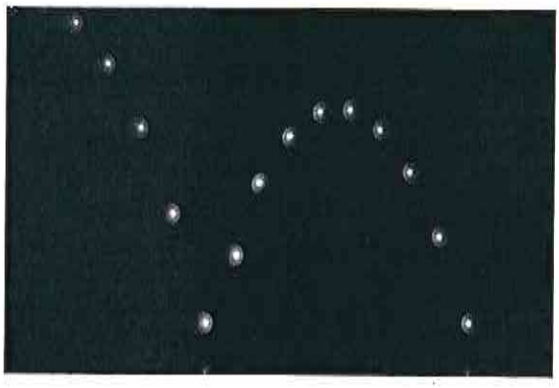
38 Se proyecta una piedra verticalmente hacia arriba con un ángulo de 22° respecto a la vertical. ¿En qué momento la componente vertical de la velocidad tiene un valor de $38\ m\ s^{-1}$?
- **a** ¿Cuál es el valor de la componente horizontal de la velocidad en ese momento?
- **b** Al cabo de otro segundo,
  - **i** la componente horizontal
  - **ii** la componente vertical

  ¿será mayor, menor o igual que antes? (Ignora los efectos de la resistencia del aire).

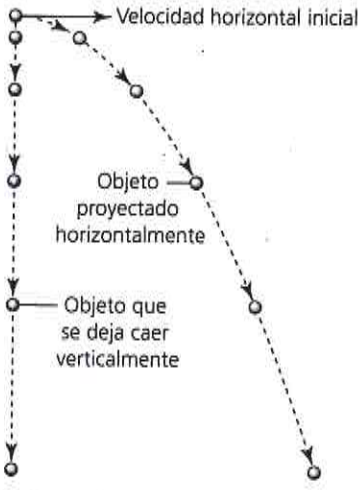
Trayectoria parabólica

En la Figura 2.41 se muestra la *fotografía estroboscópica* del rebote de una pelota. En una fotografía estroboscópica los intervalos de tiempo entre las distintas posiciones de la pelota son siempre iguales.

La **trayectoria** habitual de un proyectil es **parabólica** (con forma de parábola o de fragmento de parábola) cuando la resistencia del aire es despreciable. Por ejemplo, en la Figura 2.42 se representa la trayectoria de un objeto proyectado horizontalmente comparada con la de un objeto que se deja caer verticalmente en el mismo momento. Fíjate en que ambos objetos caen la misma distancia vertical en el mismo tiempo.



■ **Figura 2.41**
Trayectoria parabólica del rebote de una pelota



■ **Figura 2.42**
Trayectoria parabólica de un objeto proyectado horizontalmente comparada con la de un objeto que se deja caer verticalmente

La distancia y el tiempo recorridos por los diversos proyectiles ha sido objeto tradicional de estudio científico y ha producido interesantes resultados. La grabación en vídeo y el posterior análisis de los registros facilita mucho la realización de este tipo de estudios, así como su exactitud. Existen asimismo numerosas simulaciones por ordenador que permiten a los estudiantes comparar rápidamente diversas trayectorias correspondientes a distintas condiciones.

Aplicaciones

Balística

El estudio de la utilización de los proyectiles se denomina *balística*. Los estrechos vínculos con la caza y con los enfrentamientos armados hacen de la balística un área de la ciencia con una larga historia que se remonta tan atrás como las jabalinas o los arcos y las flechas. En la época medieval existía una confusión muy común respecto al movimiento de las balas de cañón (Figura 2.43): se creía que se desplazaban en línea recta hasta que se quedaban sin energía.

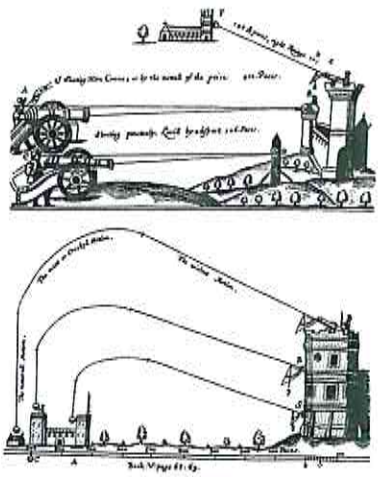


Figura 2.43
Las trayectorias de las balas de los cañones eran objeto habitual de confusión

Figura 2.44
Una bala «congelada» mediante una fotografía de alta velocidad

En el siglo XIX, la aparición de las fotografías de sucesión rápida se convirtió en una útil herramienta para el análisis de diversos tipos de movimiento, pero las trayectorias de movimiento muy rápido (como las de los proyectiles) fueron difíciles de comprender hasta que se pudieron filmar o bien iluminar con haces de luz muy rápidos (estroboscopios). La obtención de la fotografía de una bala disparada con un arma como la que se muestra en la Figura 2.44 requiere el uso de alta tecnología, como un flash de alta velocidad y grabadores de imagen muy sensibles, con el objetivo de «congelar» el proyectil (la bala) en movimiento rápido (más de 500 m s^{-1}).

Utiliza Internet para descubrir la obra de Eadweard Muybridge.

Efectos de la resistencia del aire

En la práctica, ignorar los efectos de la resistencia del aire puede ser poco realista, especialmente en el caso de objetos pequeños y/o objetos que se mueven con rapidez. Por tanto, es importante comprender (aunque solo sea en líneas generales) cómo afecta la resistencia del aire al movimiento de los proyectiles.

La *resistencia del aire (resistencia aerodinámica)* produce una fuerza que se opone al movimiento. Sin resistencia del aire asumimos que la componente horizontal de la velocidad del proyectil es constante, pero con resistencia del aire esta componente decrece. Sin resistencia del aire, el movimiento vertical siempre tiene una aceleración hacia abajo de 9,81 m s^{-2}, pero con resistencia del aire esta aceleración se reduce para los objetos que caen y la deceleración aumenta para los objetos que suben.

En la Figura 2.45 se muestran las trayectorias habituales con resistencia del aire y sin ella. Observa que con resistencia del aire la trayectoria ya no es ni parabólica ni simétrica.

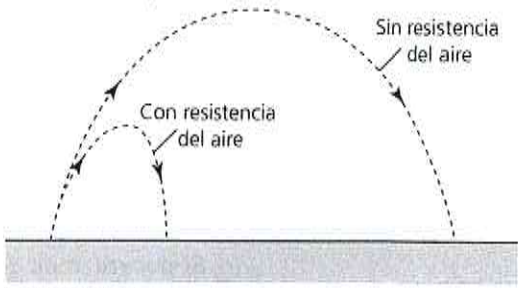


Figura 2.45
Efecto de la resistencia del aire sobre la trayectoria de un proyectil

Cálculo del movimiento de un proyectil

Si se conoce la velocidad (en valor numérico y en dirección) en cada momento de un proyectil cualquiera que se desplaza por el aire, se pueden utilizar las ecuaciones de movimiento para

determinar la velocidad del objeto en cualquier momento durante su trayectoria. *Para efectuar cualquiera de estos cálculos debemos suponer que no hay resistencia del aire y que la aceleración hacia abajo debida a la gravedad tiene siempre el valor 9,81 m s^{-2}.*

La transformación de energía potencial gravitatoria (mgh) en energía cinética ($\frac{1}{2}mv^2$) permite en ocasiones resolver el problema de otra forma; si igualamos las expresiones de ambas energías, podemos ver que para una masa en reposo que cae por una altura vertical cercana a la superficie de la Tierra:

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

o bien

$$v = \sqrt{2gh}$$

Objetos proyectados horizontalmente

Ejemplo resuelto

8 Se dispara una bala horizontalmente con una rapidez de 524 m s–1 desde una altura de 22,0 m sobre el suelo. Calcula cuándo impactará contra el suelo.

En primer lugar necesitamos calcular durante cuánto tiempo está la bala en el aire. Podemos hacerlo considerando cuánto tiempo habría tardado la misma bala en caer al suelo si se hubiera dejado caer verticalmente desde un estado de reposo (por tanto, $u = 0$):

$$e = ut + at^2$$
$$22{,}0 = \frac{1}{2} \times 9{,}81 \times t^2$$
$$t = 2{,}12\,\text{s}$$

Sin resistencia del aire la bala continuará desplazándose con la misma componente horizontal de la velocidad (524 m s^{-1}) hasta que impacte contra el suelo al cabo de 2,12 s. Por tanto:

distancia horizontal recorrida = velocidad horizontal × tiempo

distancia horizontal = 524 × 2,12 = 1,11 × 10^3 m

39 Copia la Figura 2.45 y añádele las trayectorias de un objeto proyectado en la misma dirección con:
- **a** velocidad inicial menor
- **b** velocidad inicial mayor.

40 **a** Utiliza una hoja de cálculo para calcular los desplazamientos verticales y horizontales (cada 0,2 s) de una piedra lanzada horizontalmente desde un acantilado (con una altitud de 48 m) con una velocidad inicial de 25 m s^{-1}. Continúa los cálculos hasta que impacte contra el suelo.
b Dibuja una gráfica de la trayectoria de la piedra.

41 Se dispara un rifle horizontalmente hacia el centro de un blanco que está a 52,0 m.
- **a** Si la bala lleva una velocidad inicial de 312 m s^{-1}, ¿cuánto tiempo tardará en alcanzar el blanco?
- **b** ¿A qué distancia del centro del blanco impactará la bala?

Objetos proyectados en otros ángulos

La física es la misma para todos los proyectiles y todos los ángulos: la trayectoria sigue siendo parabólica y las componentes horizontal y vertical siguen siendo independientes entre sí. Sin embargo, las matemáticas sí son más complejas cuando el movimiento inicial no es ni horizontal ni vertical.

Los problemas más habituales son los relativos a encontrar la altura máxima y la distancia horizontal máxima (**alcance**) del proyectil.

Si conocemos la velocidad y la posición de un proyectil siempre podemos utilizar la componente vertical de su velocidad para determinar:

- el tiempo que transcurre hasta que alcanza su altura máxima y el tiempo que transcurre hasta que impacta contra el suelo
- la altura máxima alcanzada (suponiendo que su velocidad tiene una componente hacia arriba).

Por tanto, la *componente horizontal* puede utilizarse para determinar el alcance.

Si necesitamos conocer la velocidad en un instante de tiempo determinado, por ejemplo cuando el proyectil impacta contra el suelo, debemos combinar las componentes vertical y horizontal con objeto de determinar la resultante tanto en módulo como en dirección.

Ejemplo resuelto

9 Lanzamos una piedra hacia arriba desde una altura de 1,60 m sobre el suelo con una rapidez de 18,0 m s^{-1} y un ángulo de 52,0° respecto a la horizontal. Si asumimos que la resistencia del aire es despreciable, calcula:

a la altura máxima que alcanza la piedra
b la componente vertical de la velocidad cuando impacta contra el suelo
c el tiempo que tarda en alcanzar el suelo
d la distancia horizontal hasta el punto donde impacta contra el suelo
e la velocidad de impacto.

En primer lugar necesitamos conocer las dos componentes de la velocidad inicial:

$u_V = u \operatorname{sen} \theta = 18{,}0 \operatorname{sen} 52{,}0° = 14{,}2 \text{ m s}^{-1}$

$u_H = u \cos \theta = 18{,}0 \cos 52{,}0° = 11{,}1 \text{ m s}^{-1}$

a Si utilizamos $v^2 = u^2 + 2ae$ para el movimiento vertical ascendente (considerando que el sentido ascendente es positivo) y recordamos que en la altura máxima $v = 0$, obtenemos:

$0 = 14{,}2^2 + [2 \times (-9{,}81) \times e]$

$e = +10{,}3$ m sobre el punto desde el que fue lanzada la piedra; una altura total de 11,9 m.

(El uso de $\frac{1}{2}v^2 = gh$ es una forma alternativa de efectuar el mismo cálculo).

b Si utilizamos $v^2 = u^2 + 2ae$ para el movimiento total obtenemos:

$v^2 = 14{,}2^2 + [2 \times (-9{,}81) \times (-1{,}60)]$

$v = 15{,}3$ m s^{-1} hacia abajo

c Si utilizamos $v = u + at$ obtenemos:

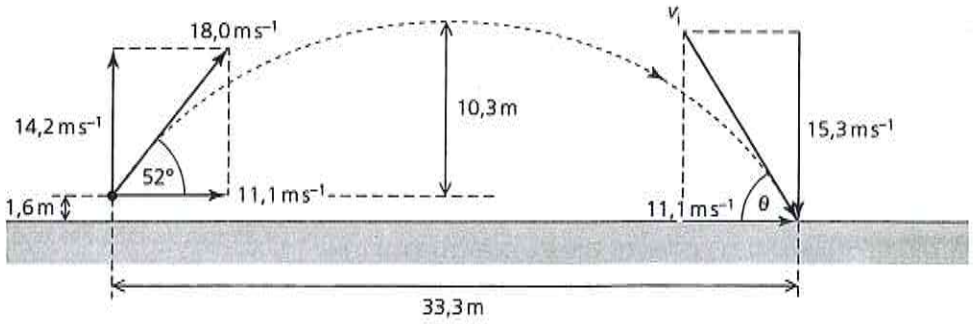
$-15{,}3 = 14{,}2 + (-9{,}81)t$

$t = 3{,}0$ s

d Si utilizamos $e = vt$ con la componente horizontal de la velocidad obtenemos:

$e = 11{,}1 \times 3{,}0 = 33{,}3$ m

e En la Figura 2.46 se ilustra la información que hemos determinado hasta ahora y el ángulo y la velocidad desconocidos.



■ **Figura 2.46**

A la vista del diagrama, podemos utilizar el teorema de Pitágoras para calcular la velocidad de impacto:

(velocidad de impacto)^2 = (componente horizontal)^2 + (componente vertical)^2

$v_i^2 = 11{,}1^2 + 15{,}3^2$

$v_i = 18{,}9 \text{ m s}^{-1}$

Podemos determinar el ángulo de impacto respecto a la horizontal, θ, utilizando trigonometría:

$\text{tg } \theta = \frac{15.3}{11{,}1}$

$\theta = 54{,}0°$

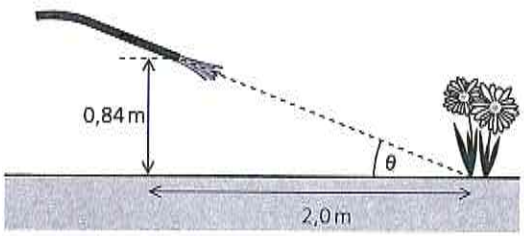
42 Repite el ejercicio del Ejemplo resuelto 9 para una piedra lanzada desde la cima de un acantilado con una velocidad inicial de $26\,m\,s^{-1}$ y un ángulo de 38° respecto a la horizontal. El punto de lanzamiento se encuentra a una altitud de 33 m.

43 El alcance máximo de un proyectil tiene lugar cuando se proyecta a un ángulo de 45 respecto al suelo (una vez más, ignora los efectos de la resistencia del aire). Calcula la distancia máxima que recorrerá una pelota de golf antes de impactar contra el suelo si su velocidad inicial es $72\,m\,s^{-1}$. (Como necesitas suponer que no hay resistencia del aire, el alcance que calcularás será muy superior al que obtienen los mejores golfistas profesionales.)

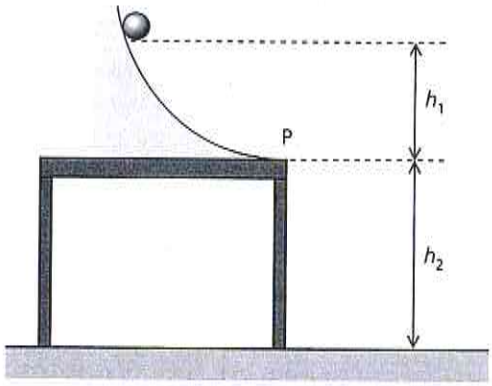
44 Un chorro de agua procedente de una manguera se dirige a la base de una flor, tal como se muestra en la Figura 2.47. El agua sale de la manguera con una velocidad de $3{,}8\ m\ s^{-1}$.
- **a** Calcula el ángulo, θ, y las componentes vertical y horizontal de la velocidad inicial del agua.
- **b** ¿A qué distancia de la base de la planta impacta el agua contra el suelo?

45 Una bola rueda por la pendiente representada en la Figura 2.48 y a continuación es proyectada horizontalmente fuera de la superficie de la mesa en el punto P.
- **a** Demuestra que el alcance máximo de la bola viene dado por la expresión $R = 2\sqrt{h_1 h_2}$. (Ignora los efectos debidos a la rotación de la bola).
- **b** ¿Qué supuesto(s) has tenido en cuenta?
- **c** Explica por qué tu respuesta para el apartado a no depende de la masa de la bola.

46 Si la distancia máxima a la que una persona puede lanzar una bola es 78 m, ¿cuál es la rapidez mínima con la que se suelta la bola? (Supón que la bola toca el suelo a la misma altura desde la que fue lanzada y que el alcance máximo para una rapidez dada se produce cuando el ángulo es 45°.)



■ **Figura 2.47**

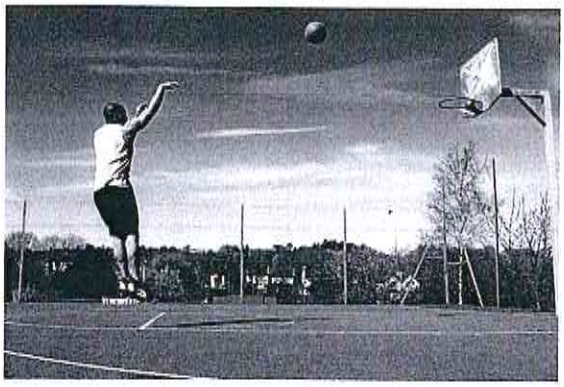


■ **Figura 2.48**

Aplicaciones

Los proyectiles en el deporte

En muchos deportes y juegos se lanza algún tipo de objeto (normalmente una pelota) a través del aire (puede ser un lanzamiento con la mano, con el pie o con otro objeto). Los ejemplos más conocidos son el baloncesto (véase la Figura 2.49), el tenis, el fútbol, el bádminton, el tiro con arco, el críquet y el golf. La habilidad de los jugadores consiste en hacer que la pelota (u otro objeto cualquiera) se mueva con la rapidez y la trayectoria adecuadas; además, el jugador también tiene que ser capaz de juzgar correctamente la trayectoria de un objeto que se mueve hacia él.



■ **Figura 2.49**
Una pelota de baloncesto se mueve describiendo aproximadamente una parábola

La masa, la forma, el diámetro y la naturaleza de la superficie de la pelota afectan al modo en que se desplaza a través del aire una vez ha sido «proyectada». Aunque en la mayoría de los deportes podemos suponer que la pelota seguirá una trayectoria a través del aire aproximadamente parabólica, si la pelota siempre siguiera una trayectoria perfectamente parabólica el juego sería predecible y la destreza del jugador cobraría menos importancia. El efecto del aire moviéndose sobre la superficie de la pelota desempeña un importante papel en muchos deportes y los buenos jugadores lo aprovechan haciendo girar la pelota sobre sí misma (rotar). La presión del aire es distinta en los lados opuestos de una pelota que gira, lo que produce una fuerza que afecta a la dirección del movimiento.

Figura 2.50
Las trayectorias de un volante de bádminton no son parabólicas

La diversión que experimentamos cuando practicamos u observamos un deporte proviene en parte de ver que la pelota que lanzamos o golpeamos se desplaza con la rapidez y la precisión adecuadas, además de recorrer una gran distancia. Es interesante considerar cómo ha evolucionado el diseño de las pelotas en diferentes deportes.

El bádminton es un deporte poco corriente porque el diseño del volante (también llamado pluma o gallito) produce deliberadamente trayectorias no parabólicas (véase Figura 2.50). El volante tiene una masa pequeña con respecto a su sección transversal, lo que significa que puede viajar muy rápido cuando se golpea por primera vez; después, la resistencia del aire tiene un efecto significativo, que se traduce en la reducción del alcance. La mayor parte de la masa del volante se encuentra concentrada en el «corcho», en el extremo opuesto de las plumas, de manera que el movimiento del volante en el aire está dirigido por el corcho.

1 ¿En qué deporte recorre una mayor distancia la pelota golpeada? Investiga si en ese deporte existe alguna regla que intente limitar la máxima distancia que puede recorrer la pelota.

2 Si dejáramos caer desde una misma altura y sobre una misma superficie dura diversas pelotas correspondientes a distintos juegos, ¿cuál de ellas rebotaría hasta una mayor altura? Explica los motivos por los que esa pelota en concreto pierde la menor fracción de su energía cuando colisiona con la superficie y por qué tiene importancia para el deporte en el que se utiliza.

3 Investiga cómo puede afectar el giro de la pelota sobre sí misma (rotación) a la dirección de la pelota.

2.2 Fuerzas

En física clásica es necesaria la acción de una fuerza para cambiar un estado de movimiento, tal como sugiere Newton en sus leyes del movimiento

Para decirlo de la forma más simple, una fuerza empuja o tira. Cuando una fuerza actúa sobre un objeto (un *cuerpo*) puede hacer que se mueva (Figura 2.51) o bien puede cambiar su movimiento si el objeto ya se está moviendo. En otras palabras, una fuerza puede cambiar la velocidad de un objeto; las aceleraciones están causadas por fuerzas.

Las fuerzas también pueden cambiar la forma de un objeto. Es decir, una fuerza puede hacer que un objeto se deforme de algún modo. Por ejemplo, cuando nos sentamos sobre una silla blanda la **deformación** es fácil de ver. Sin embargo, cuando nos sentamos sobre una silla dura o sobre el suelo, sigue habiendo una deformación pero habitualmente es demasiado pequeña para que se vea.

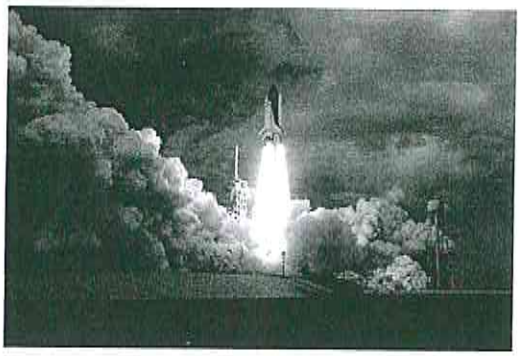


Figura 2.51
La fuerza ascendente que actúa sobre un cohete lo acelera hacia el espacio exterior

El efecto de una fuerza depende claramente de la dirección sobre la que actúa. La fuerza es una magnitud *vectorial*. Como cualquier vector, una fuerza puede ser representada mediante el dibujo de un segmento con la longitud adecuada y en la dirección y sentido correctos (indicados mediante una flecha) desde el *punto de aplicación* o hacia este. La flecha que representa el vector debe ir correctamente etiquetada con un nombre o un símbolo aceptado. La longitud del segmento debe ser *proporcional* al módulo de la fuerza. Por ejemplo, las flechas de la Figura 2.52 representan los distintos pesos de dos personas.

Cuando decimos que las fuerzas actúan sobre un objeto podemos emplear indistintamente las expresiones *aplicar* una fuerza a un objeto o *ejercer* una fuerza sobre un objeto.

El símbolo que se utiliza para representar la fuerza es F y la unidad del SI para la fuerza es el **newton**, N. Se define 1 newton como la fuerza (resultante) que hace que una masa de 1 kg se acelere $1\,m\,s^{-2}$.

Los objetos como partículas puntuales

En situaciones simples, cuando se aplica una fuerza sobre un objeto, su forma y su tamaño no suelen tener demasiada importancia y el hecho de añadir detalles a su representación gráfica puede llevar a confusión. Nos podríamos preguntar, por ejemplo, si un objeto que hemos dibujado con un cierto tamaño rota o se inclina cuando actúa una fuerza sobre él. Véase la Figura 2.61 como ejemplo. Por este motivo y también por simplicidad, los objetos se suelen representar como puntos – **partículas puntuales.**

Distintos tipos de fuerzas

Además de las fuerzas que tiran de algo o que lo empujan, las más habituales en la vida diaria, estamos rodeados de numerosos tipos de fuerzas. En el apartado siguiente introduciremos y explicaremos brevemente estos tipos de fuerzas:

- peso
- tensión y compresión
- fuerzas de reacción
- fricción y resistencia del aire
- empuje
- otras fuerzas en las que no hay contacto (como el peso)

Peso

El **peso**, *P*, de una masa es la **fuerza gravitatoria** que tira de ella hacia el centro de la Tierra. El peso y la masa están relacionados mediante la ecuación:

$$P = mg$$

En esta ecuación, P es el peso en newtons, m es la masa del objeto en kilogramos y g es la aceleración debida a la gravedad en metros por segundo al cuadrado ($m\ s^{-2}$). Cuanto mayor es la masa del objeto, mayor es su peso.

Una interpretación alternativa de g es como cociente entre el peso y la masa, $g = P/m$. Si la expresamos así, g se conoce como **intensidad del campo gravitatorio**, con la unidad newtons por kilogramo $N\,kg^{-1}$ ($1\ N\,kg^{-1} = 1\ m\,s^{-2}$). Una masa determinada pesa menos en la Luna que en la Tierra porque nuestro satélite tiene una menor intensidad del campo gravitatorio.

El valor aceptado de g sobre la superficie terrestre o cerca de esta es $9{,}81\ m\ s^{-2}$, aunque puede variar ligeramente según la ubicación, como vimos en la Tabla 2.1. Para cálculos rápidos se suele utilizar el valor $g = 10\ m\ s^{-2}$, una aproximación que representa solo un 2% de diferencia. El valor de g disminuye a medida que aumenta la distancia respecto al centro de la Tierra. Por ejemplo, a una altura de 300 km sobre la superficie terrestre el valor de g ha disminuido ligeramente hasta $9{,}67\ m\ s^{-2}$. Esto significa que los objetos que están a esa altura, como los satélites o los astronautas que orbitan alrededor de la Tierra, no son ingrávidos (como se suele creer), sino que pesan solo algo menos que sobre la superficie de la Tierra.

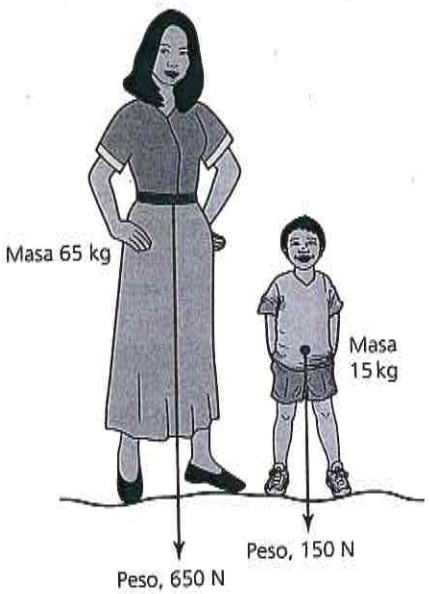


Figura 2.52
El peso actúa hacia abajo desde el centro de masas

Si queremos representar el peso de un objeto mediante un diagrama, utilizamos una flecha con la longitud apropiada y que apunta verticalmente hacia abajo desde el **centro de masas** del objeto, tal como se muestra en la Figura 2.52. Se puede considerar que el centro de masas representa la posición «media» de toda la masa del objeto. En los objetos simétricos y uniformes el centro de masas coincide con el centro geométrico.

La masa de un objeto es siempre la misma con independencia del lugar del universo donde se encuentre, pero la fuerza gravitatoria que actúa sobre el objeto (su peso) varía en función de su ubicación. Por ejemplo, la aceleración debida a la gravedad (intensidad del campo

gravitatorio) sobre la Luna es de 1,6 m s^{-2} y sobre Marte es de 3,7 m s^{-2}. La aceleración debida a la gravedad es distinta sobre la Luna o sobre Marte porque ambos tienen masas y tamaños distintos en comparación con la Tierra. En el espacio profundo, a una distancia muy grande de cualquier estrella o planeta, un objeto cualquiera sería (casi) ingrávido.

Desafortunadamente, en el lenguaje cotidiano la palabra «peso» se utiliza erróneamente para hacer referencia a la masa de un objeto, por ejemplo en kg (no el peso en N), y a la pregunta «¿cuánto pesa tal objeto?» se suele responder en kilogramos y no en newtons. Se trata de una confusión muy habitual con la que todo estudiante o profesor de física se tiene que enfrentar en algún momento.

Ejemplo resuelto

10 Un astronauta tiene una masa de 62,2 kg. ¿Cuál sería su peso en las ubicaciones siguientes?
- **a** sobre la superficie de la Tierra
- **b** en un satélite a 300 km de la Tierra
- **c** en la Luna
- **d** en Marte
- **e** muy lejos de cualquier planeta o estrella

a $P = mg = 62{,}2 \times 9{,}81 = 610\,\text{N}$
b $P = 62{,}2 \times 9{,}67 = 601\,\text{N}$
c $P = 62{,}2 \times 1{,}6 = 100\,\text{N}$
d $P = 62{,}2 \times 3{,}7 = 230\,\text{N}$
e cero

47 Calcula el peso de los objetos siguientes sobre la superficie terrestre:
- **a** un coche de masa 1250 kg
- **b** un recién nacido de masa 3240 g
- **c** un alfiler de un montón de 500 alfileres que tiene una masa total de 124 g.

48 Una chica tiene una masa de 45,9 kg. Utiliza los datos de la Tabla 2.1 para calcular la diferencia entre su peso en Bangkok y su peso en Londres.

49 **a** Se dice que «un avión A380 tiene un peso máximo de despegue de 570 toneladas» (Figura 2.53). Una tonelada equivale a una masa de 1000 kg. ¿Cuál es el peso máximo del avión (en newtons) durante el despegue?
- **b** El avión puede transportar unos 850 pasajeros como máximo. Estima la masa total de los pasajeros más la tripulación. ¿A qué porcentaje de la masa total en el momento del despegue corresponde?
- **c** El peso máximo de aterrizaje es «390 toneladas». Indica un motivo por el que el avión necesita tener menor masa cuando aterriza que cuando despega.
- **d** Calcula la diferencia de masa y explica a dónde ha ido la masa «perdida».

Figura 2.53
El Airbus A380 es el mayor avión de pasajeros del mundo

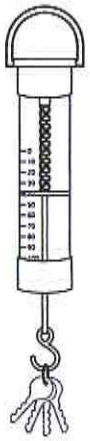
50 El peso de un objeto disminuye muy ligeramente a medida que aumenta su distancia respecto a la superficie terrestre. Sugiere un motivo por el que no cabe esperar que aumente el peso de un objeto situado en la galería de una mina y por tanto más cerca del centro de la Tierra.

51 Una masa de 50 kg tendría un peso de 445 N sobre el planeta Venus. ¿Cuál es la intensidad del campo gravitatorio en Venus? Compárala con el valor de g sobre la superficie terrestre.

52 Considera dos esferas sólidas construidas con el mismo metal. El radio de la esfera A es el doble del radio de la esfera B. Calcula el cociente de las circunferencias, las áreas superficiales, los volúmenes, las masas y los pesos de ambas esferas.

Aplicaciones

Dinamómetros y balanzas

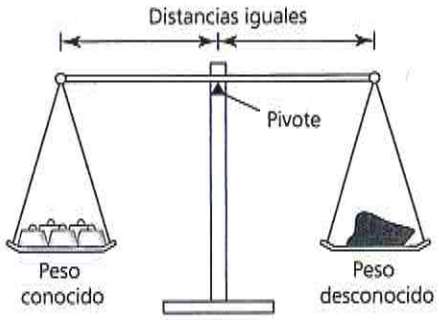


■ **Figura 2.54**
Dinamómetro

La manera más fácil de medir una fuerza es a través de los cambios de longitud que produce cuando se estira o se comprime un resorte (o un elemento similar). Los instrumentos que se utilizan para ello se denominan *dinamómetros* (o también *medidores de fuerza con divisiones en newtons* o *balanzas de resorte*) – véase Figura 2.54. En este tipo de instrumentos normalmente el resorte experimenta un cambio de longitud que es proporcional a la fuerza aplicada. La longitud del resorte se representa sobre una escala lineal que puede calibrarse (mediante unas divisiones) en newtons. El resorte vuelve a su forma original una vez se ha medido la fuerza.

Estos instrumentos se pueden utilizar para medir fuerzas que actúan en cualquier dirección, pero también se emplean de forma generalizada para medir pesos. La otra manera habitual de medir pesos es mediante algún tipo de balanza. En la balanza clásica (también conocida como balanza de platillos o balanza de cruz), como la que se muestra en la Figura 2.55, el brazo se mantiene en equilibrio solo si los dos pesos son iguales; es decir, si el peso desconocido es igual al peso conocido.

En este tipo de balanza se puede desplazar el pivote para acercarlo al peso desconocido si este es mucho mayor que el peso (o los pesos) conocido(s). La calibración de la balanza se lleva a cabo mediante el *principio de los momentos*. Este principio no se trata en este curso, pero es posible que a los alumnos les resulte familiar de cursos anteriores.

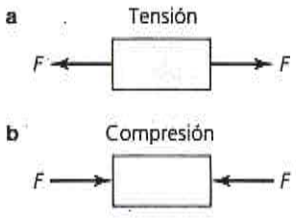


■ **Figura 2.55**
Balanza clásica

Para determinar un peso desconocido (N) se puede utilizar cualquiera de los dos métodos anteriores, basados ambos en la fuerza de la gravedad. Sin embargo, estos instrumentos suelen estar calibrados para indicar masa (en kg o en g) más que para indicar peso. El motivo es que normalmente nos interesa más conocer la cantidad de algo que los efectos de la gravedad sobre este algo. Habitualmente suponemos que la masa (kg) = peso (N)/9,81 en cualquier lugar de la Tierra, ya que las variaciones de la aceleración debida a la gravedad, g, son insignificantes para la mayoría de propósitos, aunque no para todos.

■ **Figura 2.56**
Un anillo caro

1 Si compraras una determinada cantidad de algo pequeño y caro, como oro o diamantes (Figura 2.56), ¿cómo crees que debería medirse, como masa o como peso? Razona tu respuesta.



■ **Figura 2.57**
Objeto sometido a tensión **a** *y a compresión* **b**

Tensión y compresión

Decimos que un objeto está sometido a **tensión** (Figura 2.57a) cuando está siendo estirado por dos fuerzas iguales y en sentido contrario (opuestas). Las cuerdas o las gomas son ejemplos familiares de objetos sometidos a tensión, pero las *fuerzas de tracción* son muy habituales en objetos más rígidos, como las barras horizontales que se ponen en un taburete o en una silla para apoyar las piernas.

Decimos que un objeto está sometido a **compresión** (Figura 2.57b) cuando está siendo apretado por dos fuerzas iguales y en sentido contrario (opuestas).

Todas las estructuras tienen partes que están sometidas a tensión y partes que están sometidas a compresión. Los pilares de piedra de Stonehenge (Reino Unido) resisten la compresión producida por su propio peso y por el peso de los bloques que descansan sobre ellos (Figura 2.58).

■ **Figura 2.58**
Stonehenge fue construido hace unos 4000 años

Los bloques horizontales situados sobre los pilares se curvan *muy* ligeramente, de forma que la superficie superior está sometida a compresión y la superficie inferior está sometida a tensión, lo que puede producir grietas que se extienden hacia arriba. Los mismos principios se aplican a la construcción de todos los edificios modernos, puentes, etc. A modo de ejemplo podemos considerar la Figura 2.59, en la que se representa un esquema de un puente de suspensión con las partes que están sometidas a tensión (T) y a compresión (C). Los estudiantes de física suelen realizar un ejercicio que consiste en la construcción de puentes a escala siguiendo diversos diseños, seguida de la observación y verificación de su resistencia mediante el añadido de pesos cada vez mayores.

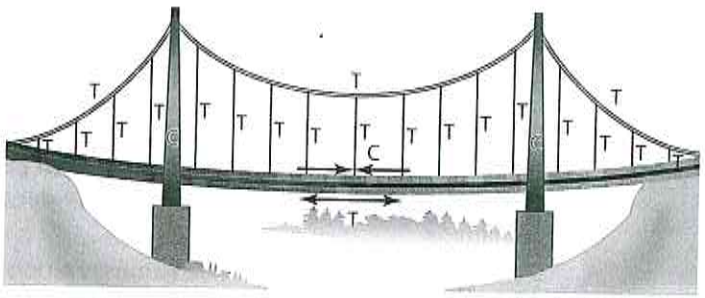


Figura 2.59
Puente de suspensión a escala

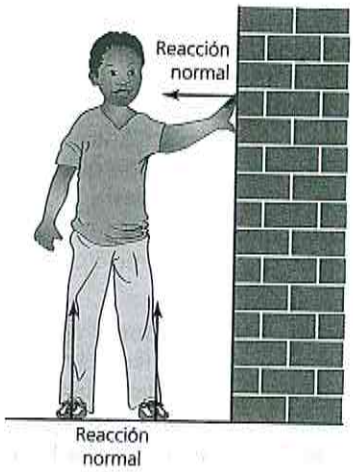


Figura 2.60
Fuerzas de reacción

Fuerzas de reacción

Si dos objetos se tocan (están en *contacto*) cada uno de ellos ejerce una fuerza sobre el otro. Por ejemplo, si empujas una pared, la pared también te empuja a ti. Cuando estás de pie sobre el suelo, tu peso ejerce una fuerza hacia el suelo y lo empuja hacia abajo, pero el suelo también ejerce una fuerza sobre ti y te empuja hacia arriba. Si no fuera así, penetrarías en la pared o en el suelo.

En la Figura 2.60, el peso del muchacho ejerce una fuerza contra el suelo y su mano también ejerce una fuerza sobre la pared. La fuerza que ejerce la pared sobre la mano del muchacho y la fuerza que ejerce el suelo sobre sus pies son ejemplos de **fuerzas de contacto** (también llamadas *fuerzas de reacción*). Estas fuerzas siempre son perpendiculares a la superficie y este es el motivo por el que a menudo se denominan **fuerzas de reacción normales** (la palabra «normal» en este contexto significa perpendicular).

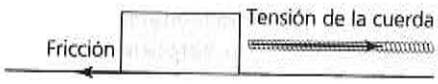


Figura 2.61
Fricción que se opone al movimiento

Fricción sólida

Cuando un objeto se mueve (o intenta moverse) y está en contacto con otra superficie, la fuerza que se ejerce entre ambas superficies actúa de algún modo *oponiéndose* al movimiento (intentando evitarlo). Este tipo de fuerza se denomina **fricción**.

Existen muchos métodos para intentar reducir los efectos de la fricción con el objeto de facilitar el movimiento, pero nunca se puede vencer del todo. La fricción entre dos objetos actúa en dirección paralela a las superficies de ambos y en sentido opuesto al del movimiento (o el intento de movimiento). Esto se muestra en la Figura 2.61, en la que se representa un bloque que está siendo acelerado mediante una cuerda que tira de él y lo arrastra por el suelo.

Figura 2.62
Necesitamos la fricción para caminar

Sin fricción el movimiento sería muy difícil. Considera cómo caminas por una habitación (Figura 2.62): para dar un paso, el pie ejerce una fuerza sobre el suelo que va hacia atrás y, como consecuencia de la fricción, el suelo ejerce una fuerza sobre el pie que va hacia delante (en el sentido del movimiento). Si no hubiera fricción no se podría caminar y la mayoría de los métodos de transporte no funcionarían.

La fricción se explica con más detalle posteriormente en este mismo capítulo.

Resistencia del aire

La **resistencia del aire** (también denominada **resistencia aerodinámica**) es también una fuerza que se opone al movimiento. Un objeto que se mueve a través del aire tiene que desplazar el aire de su trayectoria, lo que produce una fuerza en sentido opuesto al del movimiento.

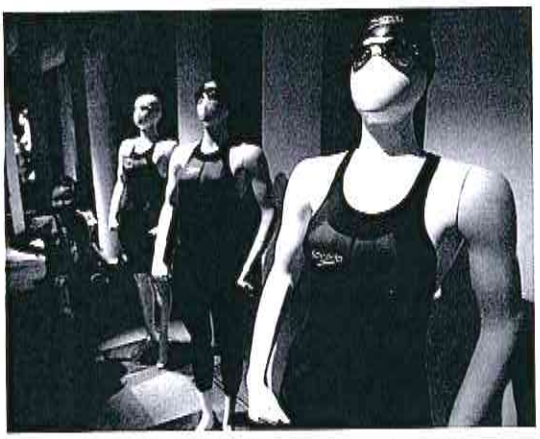


Figura 2.63
El traje de baño LZR Racer se ha diseñado utilizando tecnología de la NASA

El análisis de los factores que afectan a la resistencia del aire es de gran importancia cuando se estudian objetos en caída libre, paracaídas y todo tipo de medios de transporte (en especial los vehículos que se mueven a gran velocidad). Además, tiene interesantes aplicaciones en el mundo del deporte.

La magnitud de la resistencia del aire depende del área transversal del objeto en movimiento, pero también depende del modo en que el aire atraviesa las superficies. Los cambios en la forma de un objeto o en la naturaleza de sus superficies pueden tener un importante efecto sobre la resistencia del aire que experimenta. El cambio de la forma y/o la superficie de un objeto (en particular de su parte delantera) con el objetivo de reducir la resistencia del aire se denomina *optimización aerodinámica*.

Y aún más importante, cuanto más rápido se mueve un objeto mayor es la resistencia del aire que se opone a este movimiento. Habitualmente se considera que la resistencia del aire para un objeto dado es proporcional a su velocidad *al cuadrado*. Esto significa que la resistencia del aire cobra *mucha* importancia en objetos que se mueven muy rápidamente. La resistencia del aire que se opone al movimiento de un velocista de 100 m lisos que corre a 10 m s^{-1} podría ser 400 veces mayor que la que experimenta una persona que pasea a 0,5 m s^{-1}. Los efectos de frenado que produce la resistencia del aire sobre un coche que viaja a una velocidad media de 30 km h^{-1} por las calles de un centro urbano son mucho menores que si el mismo coche viaja por una vía rápida a 110 km h^{-1} (en este segundo caso los efectos de la resistencia del aire son 13 veces mayores que en el primero).

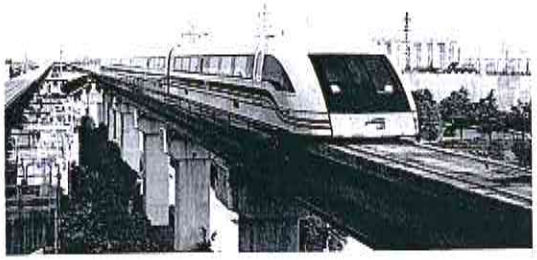


Figura 2.64
Tren de levitación magnética de Shanghái

En el caso de personas o animales que se desplazan por el agua (o sobre ella) se pueden aplicar ideas similares a las de la resistencia aerodinámica, pero en este caso se denomina resistencia hidrodinámica. Por ejemplo, la magnitud de la resistencia hidrodinámica que experimenta un nadador se puede reducir aproximadamente un 5% mediante el uso de trajes de baño hidrodinámicos, como los que se muestran en la Figura 2.63. Por descontado, es muy importante que el traje de baño no afecte de ningún modo al movimiento del nadador y que su peso sea insignificante.

En la Figura 2.64 se muestra uno de los trenes de levitación magnética (tipo «maglev») que conectan Shanghái con su aeropuerto principal, situado a unos 30 km de la ciudad. Las fuerzas magnéticas levantan el tren por encima de la superficie de la vía para eliminar la fricción y la forma optimizada del tren está diseñada para reducir la resistencia del aire. El tren recorre el trayecto en unos 7 minutos y alcanza una velocidad máxima de unos 430 km h^{-1}, aunque en pruebas de velocidad puede superar los 500 km h^{-1}.

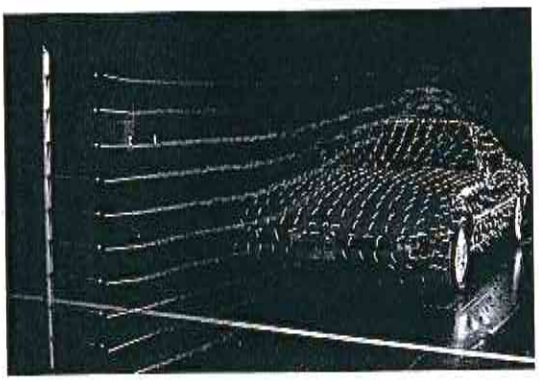


Figura 2.65
Prueba en un túnel de viento

El efecto de la resistencia del aire sobre los distintos objetos se suele evaluar en los llamados «túneles de viento» (Figura 2.65). En estos túneles no es el coche el que se mueve respecto al aire en reposo, sino que se lanza sobre el coche una ráfaga de aire a gran velocidad.

Aplicaciones

Viajes en avión

Los aviones consumen grandes cantidades de combustible para desplazar personas y bienes de un lugar a otro rápidamente, pero poco a poco todos vamos tomando conciencia de los efectos de los viajes en avión sobre el calentamiento global y la contaminación del aire. Algunas personas piensan que los gobiernos deberían penalizar con más impuestos los viajes en avión con el objetivo de disuadir a la gente de utilizar en exceso este medio de transporte. El perfeccionamiento de los medios de transporte ferroviarios, especialmente los trenes de alta velocidad, también atraería a más viajeros en detrimento de los viajes en avión. Los ingenieros, evidentemente, intentar construir aviones más eficientes que consuman menos combustible, pero las leyes de la física son las que son y no se pueden violar. La eficiencia de los motores de propulsión que se construyen en la actualidad, como la de todos los demás motores térmicos, ha llegado a su límite superior.

Los aviones consumen menos combustible si la resistencia del aire que actúa sobre ellos es también menor. El diseño de aviones con optimización aerodinámica y los viajes a mayor altura, donde el aire es menos denso, permiten disminuir la resistencia del aire y por tanto el consumo. Disminuir la velocidad del vuelo también puede reducir la cantidad de combustible que se consume, como ocurre con los coches, pero en general los viajeros desean que los viajes duren lo menos posible.

La presión del aire en el exterior de un avión que se desplaza a su velocidad de crucero habitual es demasiado baja para la comodidad y la salud de los pasajeros y de la tripulación. Por tanto, la presión en el interior del avión tiene que ser aumentada, aunque los valores que alcanza siguen siendo mucho más bajos que los de la presión del aire cerca de la superficie terrestre. La diferencia entre la presión exterior e interior del avión podría causar graves problemas si el avión no estuviera diseñado adecuadamente para soportar las fuerzas adicionales.

Los aviones transportan normalmente una gran masa de combustible, y el peso del avión disminuye durante el trayecto a medida que el combustible se va consumiendo. La fuerza en sentido ascendente que soporta el peso de un avión volando proviene del aire que está siendo desplazado y varía con la velocidad y con la densidad del aire. Cuando el avión está cerca del final del trayecto puede volar a mayor altura, donde experimenta una menor resistencia del aire.

1 **a** Averigua cuánto combustible se consume en un vuelo de larga distancia, por ejemplo de 12 horas.

b Compara la respuesta anterior con la capacidad de un depósito de combustible de un coche de tamaño medio.

c En un vuelo de corta distancia hasta el 50% del combustible del avión se emplea en rodar por la pista, despegar, ascender y aterrizar, pero en los vuelos de larga distancia este porcentaje se puede reducir hasta menos del 15%. Razona esta diferencia de porcentajes

2 ¿Estás de acuerdo en que debería reducirse de algún modo el número de viajes en avión? ¿Están de acuerdo contigo los demás miembros de tu grupo? ¿Crees que el gobierno tiene el derecho o la obligación de intentar cambiar las costumbres de la gente mediante la penalización con impuestos? (Los impuestos que gravan el alcohol o el tabaco son ejemplos similares).

Empuje

El empuje es una fuerza que se ejerce verticalmente hacia arriba sobre *cualquier* objeto que se encuentre sobre o en un fluido (ya sea un gas o un líquido). Esta fuerza surge porque la presión del fluido sobre la parte inferior del objeto es mayor que la presión sobre su parte superior. El empuje actúa en sentido opuesto al peso y su efecto consiste en reducir el peso *aparente* del objeto.

Los nadadores y buceadores están familiarizados con el efecto del empuje del agua, que es la misma fuerza que mantiene un barco a flote. El peso de un objeto que flota sobre el agua o bajo el agua tiene el mismo valor que el empuje y sentido contrario a este (véase Figura 2.66). Las fuerzas de empuje también actúan sobre objetos que están en el aire, pero son menos significativas y normalmente solo se detectan en objetos muy ligeros, como los globos.

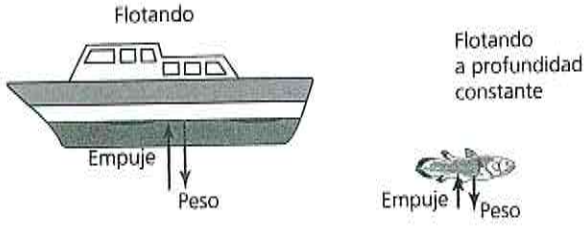


Figura 2.66 *Fuerzas sobre objetos que flotan sobre el agua o sumergidos en agua*

Fuerzas a distancia

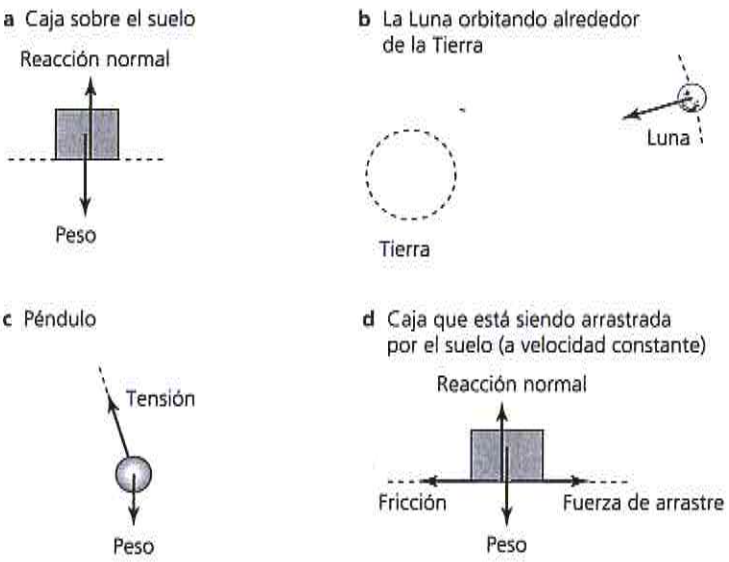
La *fuerza gravitatoria* (*peso*) es distinta a todas las fuerzas que hemos estudiado hasta ahora porque actúa a través del espacio y no es necesario que haya contacto (entre el objeto y la Tierra). Las *fuerzas magnéticas* y las *fuerzas eléctricas* se comportan de forma similar y en el interior de los átomos existen también fuerzas a distancia, las *fuerzas nucleares*. La comprensión del funcionamiento de estas **fuerzas fundamentales** desempeña un papel muy importante en la física. Estas fuerzas se tratan con más detalle en capítulos posteriores del libro.

Para explicar con detalle las fuerzas de contacto que se han enumerado al principio de este capítulo, es necesario considerar las fuerzas electromagnéticas que actúan entre las partículas de los distintos objetos/sustancias.

Diagramas de cuerpo libre

Cuando dos objetos están en contacto ejercen fuerzas uno sobre otro. Esto significa que incluso el diagrama de fuerzas más simple puede resultar confuso si incluimos todas las fuerzas. Para evitar esta confusión, se suele dibujar *un único* objeto y las fuerzas que actúan *sobre* este objeto. Las fuerzas que actúan desde el cuerpo hacia todo lo demás *no* se incluyen en el diagrama.

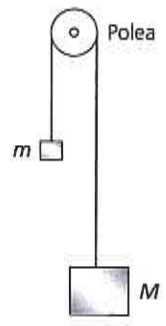
Los diagramas en los que se representa un único objeto y las fuerzas que actúan sobre él se denominan **diagramas de cuerpo libre**. En la Figura 2.67 se muestran algunos ejemplos simples de este tipo de diagramas.



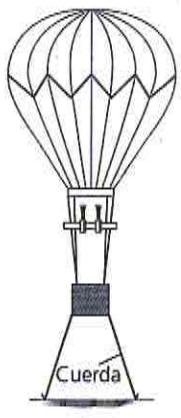
■ **Figura 2.67** *Diagramas de cuerpo libre. El contorno del objeto se dibuja con una línea sólida y las fuerzas se representan en rojo. Las líneas de puntos no hace falta incluirlas*

53 En la Figura 2.68 se representan dos masas de distinto valor conectadas mediante una cuerda que pasa por una polea sin fricción. Dibuja los diagramas de cuerpo libre donde se representan las fuerzas que actúan sobre cada masa.

54 En la Figura 2.69 se representa un globo aerostático. Las dos cuerdas impiden que se eleve verticalmente. Dibuja un diagrama de cuerpo libre en el que aparezcan todas las fuerzas que actúan sobre el habitáculo (la cesta).



■ **Figura 2.68**



■ **Figura 2.69**

Fuerza resultante y componentes de una fuerza

Resultantes

Normalmente sobre un objeto actúa más de una fuerza. Para determinar el efecto global de dos o más fuerzas sobre un objeto debemos sumarlas, lo que comporta tener en cuenta su dirección y sentido. Esta suma de fuerzas da lugar a la fuerza **resultante** (global, neta) que actúa sobre el objeto.

La suma y la diferencia de vectores, como las fuerzas, se han estudiado en el Capítulo 1. Podría resultar de ayuda revisar lo aprendido en dicho capítulo antes de continuar.

55 Tres fuerzas independientes de 1 N, 2 N y 3 N actúan a la vez sobre un mismo objeto. Si las fuerzas son paralelas entre sí, ¿cuáles son los posibles valores del módulo de la fuerza resultante?

56 Utiliza un compás para determinar la resultante de dos fuerzas de 8,5 N y 12 N que actúan con un ángulo de separación de 120°.

57 Calcula la resultante de dos fuerzas perpendiculares de 7,7 N y 4,9 N.

58 La resultante de dos fuerzas es de 74 N hacia el oeste. Si una de las fuerzas tenía una módulo de 18 N hacia el sur, ¿cuál es el módulo y la dirección de la segunda fuerza?

59 Se arrastra por el suelo (horizontal) una caja de 32 kg mediante una fuerza horizontal de 276 N. La fuerza de fricción equivale al 76% de su peso.
- **a** Dibuja un diagrama de cuerpo libre para la caja.
- **b** ¿Cuál es la fuerza resultante sobre la caja?

Componentes

Dos o más fuerzas pueden combinarse para obtener una resultante, pero el proceso «contrario» es igualmente importante.

Se puede considerar que una fuerza determinada equivale a la resultante de dos fuerzas independientes que se suelen escoger perpendiculares entre sí ($F\cos\theta$ y $F\operatorname{sen}\theta$). A este proceso se le denomina *descomposición* de una fuerza en dos componentes (Capítulo 1).

La descomposición de una fuerza en sus componentes se suele realizar cuando la fuerza no actúa en la dirección del movimiento. A modo de ejemplo, consideremos el péndulo que se representa en la Figura 2.70. La fuerza del peso, mg, se puede descomponer en una fuerza, F_A, que actúa en la dirección instantánea de movimiento y otra fuerza, F_B, que forma un ángulo recto con F_A y que actúa en la misma dirección de la tensión de la cuerda con un módulo equivalente pero en sentido contrario.

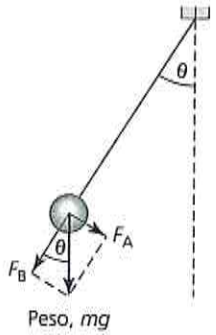


Figura 2.70
Descomposición del peso de un péndulo en sus componentes:

$F_A = mg\operatorname{sen}\theta$
$F_B = mg\cos\theta$

60 La masa del péndulo que se representa en la Figura 2.70 es 382 g y el ángulo θ es 27,4°.
- **a** ¿Cuál es la tensión de la cuerda?
- **b** ¿Cuál es la fuerza que actúa en la dirección del movimiento?

61 La masa que se representa en la Figura 2.71 está en reposo sobre la pendiente (*plano inclinado*).
- **a** Dibuja un diagrama de cuerpo libre en el que se representen las fuerzas que actúan sobre la masa.
- **b** Descompón el peso de la masa en dos componentes que sean paralela y perpendicular al plano inclinado, respectivamente.

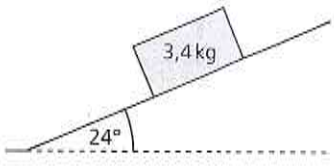


Figura 2.71

62 Una fuerza resultante de $8{,}42 \times 10^4$ N actuando sobre un tren de masa $3{,}90 \times 10^5$ kg lo acelera a razón de 0,216 ms^{-2} mientras viaja por una vía horizontal.
- **a** Si el tren empieza a subir por una pendiente que forma un ángulo de 1,00° con la horizontal, calcula la componente del peso que actúa en la dirección de la pendiente.
- **b** ¿Cuál es la nueva fuerza resultante que actúa sobre el tren?
- **c** Estima la aceleración del tren cuando empieza a subir por la pendiente.
- **d** Razona por qué le resulta más difícil subir por una pendiente escarpada a un tren que a un coche.

Equilibrio de traslación

Se dice que un objeto está en **equilibrio de traslación** cuando no actúa ninguna fuerza resultante sobre él.

El término «traslación» se refiere al desplazamiento de un lugar a otro. Estar «en equilibrio» significa que las fuerzas que actúan sobre un objeto están «compensadas», de modo que no hay efecto global y por tanto el objeto continúa moviéndose exactamente de la misma forma (o bien permanece en reposo).

■ **Figura 2.72**
El objeto está en equilibrio de traslación, pero no en equilibrio de rotación

Es importante tener en cuenta que sobre un objeto pueden actuar distintas fuerzas con la misma magnitud, direcciones paralelas y sentidos contrarios pero aplicadas *sobre líneas distintas*, de modo que puedan producir la rotación del objeto, como se muestra en la Figura 2.72. El objeto comenzará a rotar bajo el efecto de torsión de las dos fuerzas, pero no habrá movimiento de traslación. El objeto no está en *equilibrio de rotación*.

■ Primera ley del movimiento de Newton

En la primera ley del movimiento de Newton se resumen las condiciones necesarias para el equilibrio de traslación:

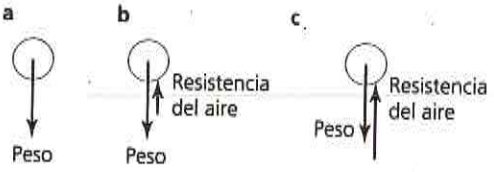
La primera ley del movimiento de Newton afirma que un objeto permanecerá en reposo o continuará moviéndose en línea recta a menos que actúe una fuerza resultante sobre él.

En otras palabras, si sobre un objeto actúa una fuerza resultante, el objeto se acelera.

Ejemplos de la primera ley de Newton

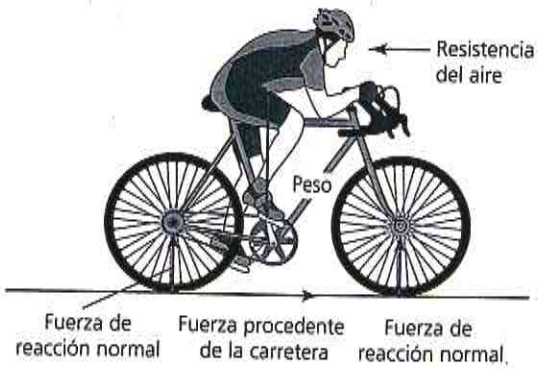
Es imposible encontrar un objeto sobre la Tierra sobre el que no actúen fuerzas porque la gravedad afecta a todas las masas. Por tanto, sobre cualquier objeto que está en equilibrio deben actuar al menos dos fuerzas, o muchas más. Sobre todos los objetos que se mueven o que tienden a moverse actúan fuerzas de fricción. Si un objeto se encuentra en equilibrio de traslación es porque las fuerzas que actúan sobre él (en cualquier línea recta) están compensadas, de modo que la fuerza resultante es cero. Consideremos los ejemplos siguientes:

- **Objetos en reposo sin fuerzas laterales** – La caja que se representa en la Figura 2.67a está en equilibrio porque su peso equivale a la fuerza de reacción normal que lo tira hacia arriba.
- **Movimiento horizontal a velocidad constante** – Consideremos la Figura 2.67d, en la que también se representa un objeto en equilibrio de traslación porque las fuerzas están compensadas. Puede estar en reposo o bien moviéndose hacia la derecha a velocidad constante (no podemos saberlo a partir de este diagrama).
- **Movimiento vertical de los objetos en caída libre** – En la Figura 2.73 se representa una pelota que cae. En **a** la pelota empieza a caer y no hay resistencia del aire. En **b** la pelota ya se ha acelerado y hay una cierta resistencia del aire que se opone al movimiento, pero todavía hay una fuerza resultante y una aceleración hacia abajo. En **c** la velocidad de la pelota ha aumentado hasta el punto de que la resistencia del aire, cada vez mayor, llega a igualar en valor al peso, aunque en sentido contrario. En este momento ya no hay fuerza resultante y la pelota se encuentra en equilibrio de traslación, por tanto cae a velocidad constante (denominada velocidad o rapidez terminal).



■ **Figura 2.73**
La fuerza resultante de un objeto que cae cambia a medida que gana rapidez

- **Aceleración horizontal** – Las fuerzas que actúan sobre una bicicleta y el ciclista se muestran en la Figura 2.74. Como la fuerza procedente de la carretera es mayor que la resistencia del aire, el ciclista acelera hacia la derecha. A medida que la bicicleta y el ciclista ganan rapidez, la resistencia del aire también aumenta. Con el tiempo, la resistencia del aire llega a tener el mismo valor que la fuerza hacia delante (aunque en sentido contrario) y se alcanza una velocidad máxima. Los principios que explican este movimiento son análogos a los que explican la velocidad terminal de un objeto en caída libre y a los que se aplican al movimiento de todos los vehículos.



■ **Figura 2.74**
Un ciclista acelerando

Sabemos que cualquier objeto que lleva un tiempo en reposo (como un libro que está sobre una mesa) se encuentra en equilibrio y que un objeto que se mueve a velocidad constante también lo está. Sin embargo, hay que tener en cuenta que un objeto en movimiento que está en reposo momentáneamente no está en equilibrio. Por ejemplo, una piedra lanzada verticalmente hacia arriba se queda en reposo durante un instante cuando alcanza su altura máxima, pero la fuerza resultante no es cero y por tanto no está en equilibrio. Análogamente, cuando empieza la carrera el velocista está en reposo, pero es justamente el momento en el que la fuerza resultante y la aceleración son mayores.

Tres fuerzas en equilibrio

Para conseguir el equilibrio de una masa sobre la que actúan dos fuerzas puede añadirse una tercera fuerza con el mismo módulo y dirección que la resultante de las otras dos pero en sentido contrario. Las tres fuerzas deben actuar sobre el mismo punto. Por ejemplo, en la Figura 2.75 se representa el diagrama de cuerpo libre de una pelota en suspensión en el extremo de un trozo de cuerda y que se mantiene en equilibrio mediante una fuerza lateral cuya magnitud es igual a la de la resultante del peso más la tensión de la cuerda.

El equilibrio de tres fuerzas se puede estudiar de una manera simple conectando tres dinamómetros a un mismo objeto sobre una superficie horizontal, como se muestra en la Figura 2.76. El sistema se mantiene en reposo para una amplia gama de combinaciones de fuerzas y ángulos, todos ellos fácilmente medibles.

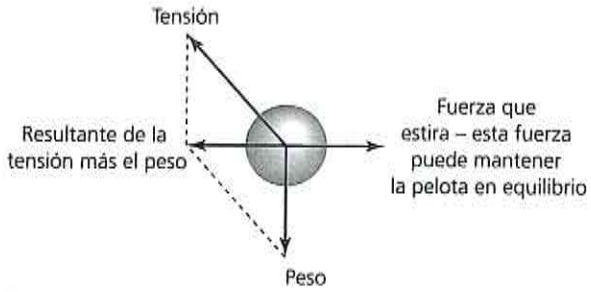


Figura 2.75
Una pelota en suspensión se mantiene en equilibrio mediante tres fuerzas

Figura 2.76
Estudio de tres fuerzas en equilibrio

63 Dibuja un diagrama de cuerpo libre en el que figuren claramente todos los elementos de interés para los casos siguientes:
a un coche que se desplaza horizontalmente a velocidad constante
b un avión que se desplaza horizontalmente a velocidad constante
c un barco que decelera una vez se ha apagado el motor
d un coche que acelera subiendo por una cuesta.

64 La trayectoria de un objeto lanzado verticalmente y sobre el que no actúa la resistencia del aire se representa en la Figura 2.77. Copia el diagrama y añádele vectores que representen las fuerzas que actúan sobre el objeto en cada posición.

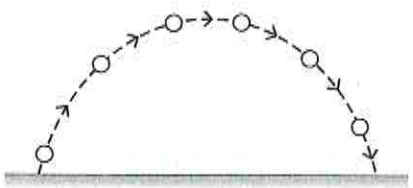


Figura 2.77

65 Una maleta rígida que reposa sobre el suelo tiene una masa de 30,6 kg.
a Dibuja un diagrama de cuerpo libre donde figuren claramente las fuerzas que actúan sobre la maleta.
b Vuelve a dibujar el diagrama para representar ahora todas las fuerzas que actúan en el caso de que alguien intente levantar la maleta del suelo con una fuerza vertical de 150 N.

66 Colócate sobre una báscula de baño con un libro pesado en las manos. Mueve rápidamente el libro hacia arriba mientras observas la lectura de la balanza. Repite el experimento pero esta vez moviendo el libro rápidamente hacia abajo. Describe tus observaciones.

67 a Si estás en un ascensor con los ojos cerrados, ¿puedes distinguir si estás parado, subiendo o bajando? Razona tu respuesta.

b Una persona que viaja en ascensor experimenta dos fuerzas: su peso, que tira hacia abajo, y la fuerza de reacción normal ejercida desde el suelo del ascensor y que tira hacia arriba. Dibuja un diagrama de cuerpo libre en el que se representen las fuerzas que actúan sobre una persona que está en un ascensor si:

i el ascensor se mueve a velocidad constante
ii el ascensor comienza a moverse hacia abajo
iii el ascensor comienza a moverse hacia arriba
iv el ascensor decelera después de haber estado moviéndose hacia abajo
v el ascensor decelera después de haber estado moviéndose hacia arriba.

68 Un paracaidista cae con una velocidad terminal de unos 200 km h^{-1} cuando abre el paracaídas.

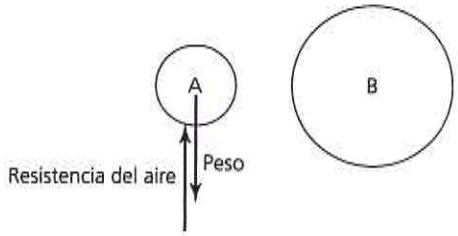
a Dibuja un diagrama de cuerpo libre en el que se representen las fuerzas que actúan sobre el *paracaidista*:
i justo en el momento en que se abre el paracaídas
ii justo antes de que el paracaidista toque el suelo.

b Dibuja un diagrama de cuerpo libre donde se represente esquemáticamente la variación de la velocidad del paracaidista desde el momento en que salta del avión hasta el momento en que aterriza.

69 Volvamos a la Figura 2.71, en la que se representa una caja en reposo sobre una pendiente. La caja permanece en reposo gracias a la fuerza de fricción que se opone al movimiento de bajada por la pendiente. ¿Cuál es el módulo de la fuerza de fricción?

70 En la Figura 2.78 se representa un escalador que utiliza una cuerda para escalar una montaña. Dibuja un diagrama de cuerpo libre donde se representen las fuerzas que actúan sobre el escalador.

■ **Figura 2.78**



■ **Figura 2.79**

71 En la Figura 2.79 se representan dos gotas de agua que caen una al lado de la otra con la misma velocidad instantánea. En la figura se muestran las fuerzas que actúan sobre la gota A, con un radio *r*.

a Copia el diagrama y dibuja las fuerzas que actúan sobre la gota B, con un radio 2*r*.

b Describe el movimiento inmediato de las dos gotas y explica la diferencia.

Naturaleza de la ciencia

Aristóteles y la filosofía natural

A Isaac Newton se le atribuye escribir modestamente sobre sus descubrimientos: «No sé cómo me verá el resto del mundo, pero yo me sigo viendo como un niño que juega en la orilla del mar y que se divierte encontrando un guijarro más suave o una concha más bella de lo corriente, mientras el gran océano de la verdad permanece incógnito ante mí».

La aparente humildad de Newton también se refleja en la cita siguiente: «...si he logrado ver un poco más allá es porque me he subido a hombros de gigantes». Aunque esta cita no sea estrictamente original, sí se cree que Newton reconocía el mérito de los científicos y filósofos que le precedieron. Entre ellos se encontraba Aristóteles.

Aristóteles (384–322 a.C.) fue un filósofo griego y una de las figuras fundamentales y más reconocidas en el desarrollo del pensamiento humano y la filosofía. Su obra abarca numerosos temas, entre los que se encuentran la interpretación del mundo natural y los principios de lo que actualmente denominamos ciencia. Antiguamente, la ciencia se denominaba «filosofía natural» y se abordaba de un modo muy distinto al de los métodos científicos modernos.

Aunque la «ciencia» de la época no contemplaba la observación cuidadosa, las medidas, los cálculos matemáticos o los experimentos a los que tan habituados estamos (recordemos que estamos hablando de hace 2300 años), Aristóteles sí reconocía la necesidad de explicaciones universales (que lo abarcaran todo) de los fenómenos naturales del mundo que le rodeaba.

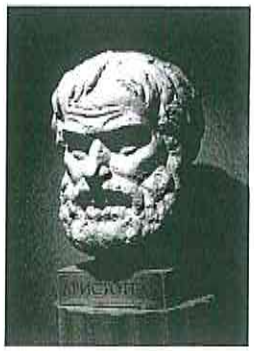


Figura 2.80
Aristóteles

Él creía que todo lo que había en el mundo provenía de la combinación de cuatro elementos a los que denominaba tierra, fuego, aire y agua. La Tierra era el centro de todo y cada uno de los cuatro elementos terrestres tenía su propio lugar. Cuando algo no se encontraba en su lugar tendía a volver a este; de esta manera explicaba, por ejemplo, por qué cae la lluvia y por qué las llamas y las burbujas ascienden.

Con nuestros vastos conocimientos actuales sobre el mundo es fácil menospreciar la obra de Aristóteles y señalar sus inconsistencias. Sin embargo, sus ideas fundamentales sobre el movimiento, por ejemplo, eran tan simples y convincentes que no fueron puestas en duda durante más de 1500 años, hasta la época de Galileo y Newton.

Fricción sólida

Como explicamos antes, la fricción es una fuerza que intenta detener el movimiento de cualquier superficie sólida sobre otro sólido con el que está en contacto. El origen de la fuerza de fricción puede ser diverso y complejo pero, en líneas generales, la magnitud de las fuerzas de fricción depende de:

- la naturaleza de los dos materiales
- la «rugosidad» de las superficies de los dos materiales (el concepto de rugosidad no es fácil de definir y aunque las superficies más rugosas suelen ocasionar mayor fricción, sería erróneo asumir que las superficies más rugosas *siempre* incrementan las fuerzas de fricción)
- las fuerzas que actúan en dirección normal a las superficies (empujándolas una contra otra).

Para reducir la fricción entre dos superficies determinadas se debe colocar algo entre ellas. Puede ser agua, aceite, aire, grafito o pequeños rodillos o bolas. Los fluidos que se utilizan con tal fin se denominan *lubricantes*.

Las fuerzas de fricción se pueden estudiar mediante un aparato simple como el que se muestra en la Figura 2.81, en la que se representa un bloque de madera que está siendo arrastrado sobre una mesa horizontal. La fuerza que tira del bloque se va aumentando hasta que el bloque empieza a moverse.

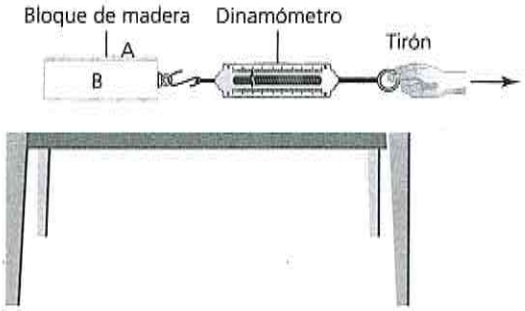
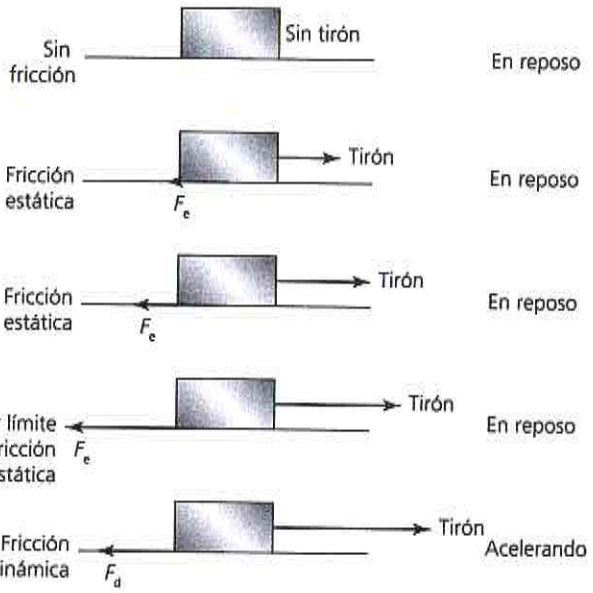


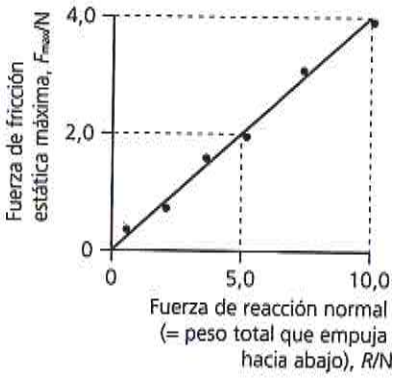
Figura 2.81
Experimento simple para medir las fuerzas de fricción

Aplicando la primera ley de Newton, si el bloque no se mueve es porque se encuentra en equilibrio de traslación; en este caso no hay fuerza resultante neta y la fuerza de fricción debe ser igual en magnitud y en sentido opuesto a cualquier fuerza que tire del bloque, como la que indica el dinamómetro. Si se tira del bloque con una fuerza mayor pero el bloque todavía no se mueve, la fuerza de fricción debe haber aumentado, pero sigue manteniéndose igual y opuesta a la fuerza que tira del bloque. La fuerza de fricción, sin embargo, tiene un límite superior, mientras que la fuerza que tira del bloque puede seguir aumentando. Llegará un momento en que la fuerza que tira del bloque superará al máximo valor posible de la fuerza de fricción. En ese momento habrá fuerza resultante neta sobre el bloque y este se acelerará (véase Figura 2.82).



■ **Figura 2.82**
Variación de las fuerzas de fricción a medida que la fuerza aplicada (tirón) aumenta

Normalmente la fuerza de fricción durante el movimiento (**fricción dinámica**) es *menor* que la fuerza máxima de fricción antes de que el movimiento haya comenzado (**fricción estática**). Se puede considerar que la fuerza de fricción dinámica es aproximadamente la misma con independencia de la velocidad. Es decir, dadas dos superficies cualesquiera, la fuerza de fricción dinámica tiene un valor aproximadamente constante, mientras que la fuerza de fricción estática puede variar desde cero hasta un valor límite.



■ **Figura 2.83**
Variación habitual del máximo de la fuerza de fricción estática respecto a la fuerza de reacción normal (para la fricción dinámica se obtiene un patrón de resultados análogo)

En la Figura 2.83 se representan los resultados habituales de la variación del valor máximo de la fuerza de fricción estática en función del peso del bloque, que se puede incrementar poniendo masas sobre su superficie. Fíjate en que el peso total equivale a la fuerza de reacción normal entre las superficies, R.

Si repetimos el experimento de la Figura 2.81 con el mismo bloque pero con la superficie B sobre la mesa, las medidas de las fuerzas de fricción serán (aproximadamente) las mismas. Aunque el área de la superficie A sea la mitad que la de la superficie B, la presión bajo el bloque se duplicará ($p = F/A$ – véase Capítulo 3), empujando a las superficies una contra otra. Según este análisis simplificado, los valores máximos de la fuerza de fricción dependen *solo* de la naturaleza de las dos superficies y de la fuerza de reacción normal entre ellas, no así del área asociada.

Si observamos la Figura 2.83 podemos ver que la fuerza de fricción estática máxima, F_{max}, es proporcional a la fuerza de reacción normal, R, de modo que:

$$\frac{F_{max}}{R} = \mu$$

donde μ es una constante para la fricción entre estos dos materiales que se puede determinar a partir de la pendiente de la recta que aparece en la gráfica.

Habitualmente se utilizan dos símbolos distintos, uno para la fricción estática, μ_e, y otro para la fricción dinámica, μ_d. Estas constantes se denominan **coeficientes de fricción**. (El término «coeficiente» hace referencia a que se trata de una constante que multiplica una variable, en este caso una fuerza). Como estos coeficientes/constantes son cocientes de fuerzas, no tienen unidades.

En la Tabla 2.2 se dan algunos ejemplos de coeficientes de fricción estática. Los valores dados corresponden a dos superficies limpias, secas, planas y suaves. Y aunque estos supuestos simplificados son un punto de partida muy útil, debe entenderse que en situaciones reales las fuerzas de fricción suelen ser complejas e impredecibles.

Tabla 2.2
Valores aproximados de los coeficientes de fricción estática

	Materiales	Coeficientes de fricción estática, (μ_e) aproximados
Acero	Hielo	0,03
Esquí	Nieve seca	0,04
Teflón	Acero	0,05
Grafito	Acero	0,1
Madera	Hormigón	0,3
Madera	Metal	0,4
Neumático de caucho	Hierba	0,4
Neumático de caucho	Superficie de una carretera (húmeda)	0,5
Vidrio	Metal	0,6
Neumático de caucho	Superficie de una carretera (seca)	0,8
Acero	Acero	0,8
Vidrio	Vidrio	0,9
Piel	Metal	0,9

Las dos ecuaciones siguientes para las fuerzas de fricción pueden encontrarse en el *Apéndice de datos de Física*.

$F_f \leq \mu_e R$
$F_f \leq \mu_d R$

Por otra parte, los máximos de las fuerzas de fricción vienen dados por $F_{max} = \mu_e R$ y $F_{max} = \mu_d R$.

Ejemplo resuelto

11 a ¿Cuál es el coeficiente de fricción para las dos superficies que se representan en la Figura 2.83?

b Si suponemos que los resultados se obtienen con un aparato como el de la Figura 2.81, ¿qué fuerza mínima se necesitaría para desplazar un bloque de masa total
- **i** 200 g?
- **ii** 2000 g?
- **iii** ¿Por qué es poco fiable la respuesta al apartado **ii**?

c Considerando el mismo aparato anterior con una masa de 200 g, estima un valor para la fuerza de fricción dinámica en los siguientes casos:
- **i** un movimiento a $1{,}0\,m\,s^{-1}$
- **ii** un movimiento a $2{,}0\,m\,s^{-1}$

a $\mu_e = \frac{F_{max}}{R} = \frac{4{,}0}{10{,}0} = 0{,}40$ (equivale a la pendiente de la recta de la gráfica).

b i $F_f = \mu_e R = \mu_e mg = 0{,}40 \times 0{,}200 \times 9{,}81 = 0{,}78\,N$
ii $0{,}40 \times 2{,}000 \times 9{,}81 = 7{,}8\,N$
iii Porque la respuesta corresponde a una extrapolación de un valor muy lejano al intervalo de resultados que se muestra en la gráfica.

c i Podríamos esperar que la fuerza de fricción dinámica fuera un poco menor que la fuerza de fricción estática máxima, pongamos 0,6 N en lugar de 0,78 N.
ii Normalmente se considera que la fuerza de fricción dinámica es independiente de la velocidad, por tanto la fuerza seguiría estando en torno a 0,6 N a la velocidad más alta.

Aplicaciones

Neumáticos y seguridad vial

La seguridad vial depende en gran medida tanto de la naturaleza de la superficie de la vía como de los neumáticos de los vehículos. La fricción entre la vía y el vehículo proporciona las fuerzas necesarias para cualquier cambio de velocidad: aceleración, frenado, cambios de dirección y giros. Un neumático liso conserva la máxima fricción cuando la vía está seca, pero cuando está húmeda, las rugosidades y las ranuras del neumático son necesarias para dispersar el agua (Figura 2.84).

■ **Figura 2.84**
Banda de rodadura de un neumático de coche

La superficie de la vía debe ser lo suficientemente rugosa como para producir una fricción suficiente. Por tanto, conviene volver a asfaltar la vía cada pocos años para evitar que se quede excesivamente lisa. Esto último cobra especial importancia cuando hay un giro cerrado o una cuesta escarpada. Todo lo que haya entre los neumáticos y la superficie de la vía (por ejemplo aceite, agua, hielo o nieve) puede afectar a la fricción y tener un efecto importante sobre la seguridad vial.

El aumento del área superficial de los neumáticos de un vehículo produce un cambio en la presión bajo ellos, y este cambio, a su vez, puede modificar la naturaleza del contacto entre las superficies. Por ejemplo, para un tractor hundirse en un suelo blando es un grave problema y esa situación es más compleja que una simple fricción entre dos superficies. Los vehículos que se desplazan sobre suelo blando necesitan neumáticos con áreas superficiales grandes para evitar el posible hundimiento.

1 Utiliza Internet para averiguar qué materiales se utilizan en la construcción de neumáticos y superficies viales con el fin de producir coeficientes de fricción elevados.

---

72 **a** Explica qué significa que un coeficiente de fricción tenga valor cero.
b ¿Es posible que un coeficiente de fricción tenga un valor mayor que 1? Razona tu respuesta.

73 **a** Un contenedor de madera de 30 kg descansa sobre un suelo seco de hormigón. Estima la fuerza necesaria para empezar a moverlo lateralmente.
b Estima la fuerza de fricción sólida que se opone al movimiento de una chica de 55 kg que patina sobre hielo.

74 Considera la pregunta 61 y la Figura 2.71. La masa solo puede estar en reposo sobre la pendiente a causa de la fricción.
a Explica cómo se puede utilizar un plano inclinado para determinar el valor del coeficiente de fricción estática entre las superficies.
b Calcula el valor del coeficiente de fricción estática si el bloque que se muestra en el diagrama comienza a deslizarse por la pendiente cuando el ángulo es 45°.

75 El coeficiente de fricción entre un coche que se mueve y la superficie de la vía en un día seco es 0,67.
a Si el coche y su conductor tienen una masa total de 1400 kg, ¿qué fuerza de fricción actúa entre la vía y el neumático?
b Si entran en el coche tres pasajeros con una masa total de 200 kg, calcula el nuevo valor de la fuerza de fricción.
c Discute los posibles efectos sobre la seguridad vial del aumento del número de pasajeros de un coche.

76 ¿Cómo se puede incrementar la fricción con la vía en condiciones de hielo?

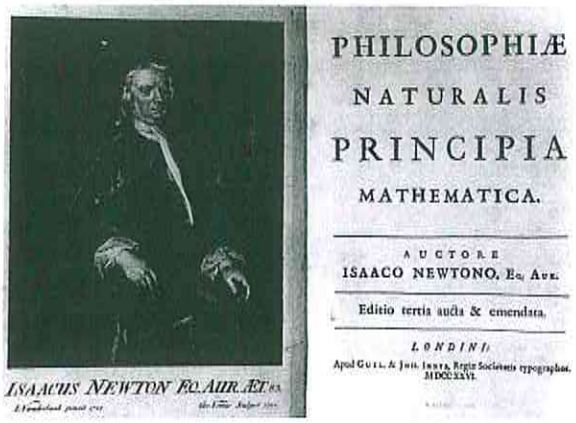
77 ¿Por qué crees que los conductores de coches de Fórmula 1 «calientan» los neumáticos de sus coches? Averigua cómo lo hacen. Sugiere también un motivo por el que los neumáticos de Fórmula 1 son tan grandes.

78 ¿En qué circunstancias crees que una superficie «rugosa» podría reducir la fricción (en lugar de aumentarla)?

Naturaleza de la ciencia

Principia de Newton: una combinación espectacular de matemáticas e intuición

Existe un amplio consenso en considerar a Isaac Newton como uno de los científicos más importantes de la historia de la humanidad. Sus tres libros, que reciben en conjunto el nombre de *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* o más comúnmente *Principia*, y que incluyen las leyes del movimiento (y de la gravitación), se encuentran entre los libros más influyentes de todas las épocas (Figura 2.85).



■ **Figura 2.85**
Primera página del libro Principia *de Newton*

Newton era británico, pero sus libros están escritos en latín. Se suele atribuir a Newton el invento del cálculo infinitesimal, necesario para avanzar en la comprensión de la mecánica. Actualmente, el cálculo desempeña un papel muy importante en la aplicación de las matemáticas en muchas ramas de la física avanzada. Sin embargo, el «invento» del cálculo infinitesimal fue objeto de debate entre Newton y el reputado matemático alemán Gottfried Leibniz, quien también se atribuía su invención. (Pero, ¿hasta qué punto se puede decir que el cálculo fue inventado? ¿O fue descubierto?)

En una de las anécdotas más famosas de la historia de la ciencia se dice que Newton sintió una repentina inspiración que le llevó a pensar en la gravedad mientras observaba una manzana que caía de un árbol. Es bonito pensar que fue un momento de *inspiración*, una *intuición*, pero nunca sabremos si la anécdota es cierta o no. El propio Newton, no obstante, hizo referencia a manzanas que caían de los árboles cuando explicaba los procesos de pensamiento que le llevaron a formular su ley de gravitación universal.

Los momentos repentinos e inesperados de inspiración siempre han desempeñado un importante papel en el desarrollo de nuevas ideas en todas las áreas del pensamiento humano. Sin embargo, el inventor estadounidense Thomas Edison es conocido por decir que «el genio es un 1% de inspiración y un 99% de transpiración», sugiriendo que también se necesita trabajar duro para convertir las grandes ideas en algo práctico.

■ Segunda ley del movimiento de Newton

La primera ley de Newton establece que hay un vínculo entre la fuerza resultante y la aceleración. La segunda ley lleva está afirmación un paso más allá y establece la conexión matemática, que afirma que cuando una fuerza resultante actúa sobre una masa (constante), la aceleración es proporcional a la fuerza:

$a \propto F$

Tanto la fuerza como la aceleración son magnitudes vectoriales y la aceleración se produce en la misma dirección de la fuerza.

En la mayoría de los cursos de física se dedica un gran número de sesiones al estudio de los efectos de las distintas fuerzas y masas sobre la aceleración producida. Para obtener buenos resultados es esencial poder reducir los efectos de la fricción, para lo que se utilizan túneles de viento o pavimentos de fricción compensada. Con este tipo de experimentos también se demuestra que si se aplica la misma fuerza resultante sobre distintas masas, la aceleración producida es inversamente proporcional a la masa, m; por ejemplo, si la masa se duplica, la aceleración se reduce a la mitad.

Combinando estos resultados, vemos que la aceleración es proporcional a F/m. La segunda ley de Newton puede escribirse como:

$F \propto ma$

Si definimos la unidad de la fuerza, el newton, como la fuerza que acelera 1 kg 1 m s^{-2}, entonces podemos escribir:

fuerza (N) = masa (kg) x aceleración (m s^{-2})

$F = ma$

Esta conocida ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Pero se trata simplemente de una versión de la segunda ley de Newton restringida a masas constantes. En apartados posteriores del capítulo veremos una segunda versión de la ley de Newton cuando hayamos introducido el concepto de momento.

Fíjate en que para fuerzas gravitatorias (pesos, P), $F = ma$ se puede escribir como $P = mg$, donde g representa la aceleración debida a la gravedad. (La expresión $P = mg$ se ha usado al principio del capítulo).

La segunda ley de Newton muestra que un cambio repentino de velocidad (una aceleración o una deceleración elevadas) requiere una fuerza también elevada ($F \propto a$). Esta idea es muy útil para explicar, por ejemplo, por qué se rompe una copa de cristal cuando cae sobre el suelo, pero no necesariamente cuando cae sobre un cojín (un menor tiempo y una mayor deceleración sobre el suelo duro, de modo que las fuerzas que actúan sobre la copa son mayores).

Ejemplos resueltos

12 **a** ¿Qué fuerza resultante se necesita para acelerar 1,8 kg a 3,3 $m s^{-2}$?
b ¿Qué aceleración se produciría si se aplicara la misma fuerza a una masa de 800 g?

a $F = ma$
$F = 1{,}8 \times 3{,}3$
$F = 5{,}9\,N$

b $a = \frac{F}{m}$
$a = \frac{5{,}9}{0{,}800}$
$a = 7{,}4\,m s^{-2}$

13 El motor de un coche produce una fuerza hacia delante de 4400 N, pero las fuerzas de la resistencia del aire y de la fricción, opuestas al movimiento, representan un total de 1900 N.

a ¿Cuál es la fuerza resultante que actúa sobre el coche?

b Si el coche se acelera 1,8 m s–2 bajo la acción de esta fuerza, ¿cuál es su masa total?

a fuerza resultante, $F = 4400 - 1900$
$F = 2500\,N$ hacia delante

b $m = \frac{F}{a}$
$m = \frac{2500}{1{,}8}$
$m = 1400\,kg$

14 **a** ¿Cuál es la fuerza resultante que actúa sobre una masa de 764 g que cae hacia la Tierra (suponiendo que no hay resistencia del aire)?

b ¿Con qué nombre se conoce a esta fuerza?

a $F = ma$
$F = 0{,}764 \times 9{,}81$
$F = 7{,}49\,N$

b Esta fuerza se suele denominar peso del objeto y, en este contexto, la ecuación $F = ma$ normalmente se escribiría $P = mg$.

La segunda ley de Newton también se puede aplicar a masas pequeñas, como las de las partículas atómicas. Por ejemplo, la masa de un electrón es de $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg y si actuara sobre él una fuerza de 1 N, ¡se aceleraría a una tasa de $1{,}1 \times 10^{30}$ m s^{-2}!

Fuerzas que actúan durante un tiempo limitado

Las fuerzas resultantes que modifican las velocidades de varios objetos no siguen actuando siempre. Normalmente actúan durante unos pocos segundos o menos, y en el caso de varios **impactos** o **colisiones**, la duración de las fuerzas involucradas puede ser incluso de fracciones de segundo. (La palabra **interacción** se suele utilizar como un término general que incluye todas las situaciones posibles).

A modo de ejemplo, consideremos un objeto que cae. Si se deja caer una masa sobre una superficie, la fuerza ejercida durante el impacto *no* es igual a su peso (como se suele creer), sino que se puede calcular a partir de $F = ma$. Por ejemplo, si una masa de 2,0 kg cae sobre arena y su velocidad se reduce desde 6,0 m s^{-1} hasta cero en 0,50 s, la deceleración media es –12 m s^{-2} [(0–6,0)/0,50] y la fuerza media de deceleración es de 24 N. Si se dejara caer la misma masa a la misma velocidad pero sobre hormigón, el tiempo para el impacto sería mucho menor y la fuerza sería mucho mayor. Por ejemplo, si el tiempo para el impacto fuera de 0,050 s, la fuerza de deceleración media sería de 240 N.

Las fuerzas sobre el saltador de longitud de la Figura 2.86 se reducen porque el tiempo para el impacto aumenta gracias a que cae sobre un banco de arena.

Figura 2.86
El impacto sobre un banco de arena reduce la fuerza

Siempre que un objeto en movimiento se detiene, cuanto mayor es el tiempo para el impacto, menor es la deceleración y, en consecuencia, las fuerzas involucradas son también menores. Estas ideas son muy útiles cuando se utiliza la física para explicar, por ejemplo, cómo se reducen las fuerzas en los accidentes.

Cuando el objetivo es acelerar un objeto mediante una fuerza, cuanto mayor sea el tiempo durante el que se aplica la fuerza, mayor será el cambio de la velocidad. En muchas actividades deportivas la pelota se lanza con algún tipo de bate, palo o raqueta y cuanto mayor sea el tiempo de contacto, mejor. Este es uno de los motivos por los que se aconseja «marcar el movimiento completo» en un golpe.

79 ¿Qué fuerza resultante se necesita para acelerar un tren de masa 3,41 x 10^5 kg desde el reposo hasta 15,0 m s^{-1} en 20 s exactamente?

80 Cuando se aplica una fuerza de 5,6 N a una masa de 4,3 kg se acelera a 0,74 m s^{-2}. Calcula la fuerza de fricción que actúa sobre la masa.

81 Una avioneta de masa 12 400 kg se acelera desde el reposo por una pista mediante una fuerza resultante de 29 600 N.
a ¿Cuál es la aceleración de la avioneta?
b Si la aceleración se mantiene constante, ¿qué distancia se necesita para que la avioneta alcance su velocidad de despegue, 73,2 m s^{-1}?

82 Un coche de masa 1200 kg viaja a 22 m s^{-1} cuando el conductor pisa el pedal del freno. El coche se para tras recorrer una distancia de 69 m.
a ¿Cuál es la deceleración del coche?
b ¿Cuál es la fuerza resultante media que actúa sobre el coche?

83 Se tira horizontalmente de una caja de gran tamaño de masa 150 kg mediante una cuerda fina con el objeto de arrastrarla por el suelo. La caja comienza a moverse cuando la fuerza de fricción es de 340 N.
a Dibuja un diagrama de cuerpo libre donde se representen todas las fuerzas que actúan sobre la caja cuando esta empieza a moverse.
b Si la tensión de la cuerda es 380 N, calcula la aceleración de la caja.
c Explica qué ocurriría si se intentara acelerar la caja a 1 m s^{-2}.

84 Un bloque de metal de masa 650 g se mueve horizontalmente sobre una plancha de vidrio con una velocidad constante mientras se le aplica una fuerza de 2,8 N.
a ¿Cuál es el coeficiente de fricción dinámica para estas superficies?
b Calcula la aceleración producida sobre un bloque del mismo metal con una masa de 940 g si se tira de él por la plancha de vidrio con una fuerza de 4,5 N.

85 Una pequeña vagoneta de masa 12 500 kg se encuentra en reposo sobre una pendiente.
a Si el coeficiente de fricción estática es 0,42, ¿cuál es el mayor ángulo de inclinación (respecto a la horizontal) que permitirá que la vagoneta siga estando en reposo?
b Si la pendiente tiene justamente el grado de inclinación calculado en el apartado anterior y el motor de la vagoneta produce una fuerza de 6,0 x 10^4 N paralela a la vía, calcula la aceleración de la vagoneta al subir por la pendiente.

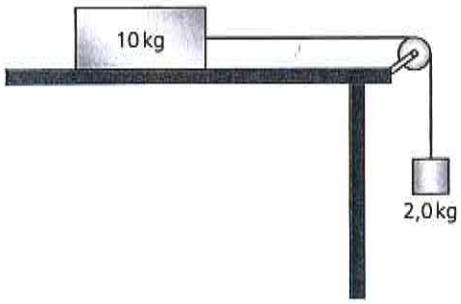
86 Utiliza la segunda ley de Newton para explicar por qué te hace más daño un golpe producido por una pelota dura que un golpe producido por una pelota blanda, si ambas pelotas tienen la misma masa y llevan la misma velocidad.

87 ¿Qué masa se necesitaría para acelerar un protón (masa $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg) a $1{,}0 \times 10^{10}\,m\,s^{-2}$?

88 Un carrito que contiene arena es empujado a través de una superficie horizontal mediante una fuerza resultante pequeña pero constante. Describe y explica el movimiento del carrito si la arena puede caer a través de un agujero situado al fondo del carrito.

89 Un hombre de 82,5 kg de masa permanece inmóvil en el interior de un ascensor que acelera hacia arriba a $1{,}50\,m\,s^{-2}$.
a ¿Cuál es la fuerza resultante que actúa sobre el hombre?
b ¿Cuál es la fuerza de reacción normal que actúa sobre el hombre y que va en sentido ascendente desde el suelo?

90 En la Figura 2.87 se representan dos masas que están conectadas mediante una correa que pasa por una polea.



■ **Figura 2.87**

a Calcula la aceleración de los dos bloques suponiendo que no hay fricción.
b ¿Qué fuerza resultante se necesita para acelerar la masa de 2,0 kg hasta el valor de la aceleración obtenido en **a**?
c Dibuja diagramas de cuerpo libre para las dos masas en los que se representen claramente los módulos y direcciones de todas las fuerzas implicadas.

91 Cuando un saltador de altura (Figura 2.88) de masa 75,4 kg salta una barra situada a 2,07 m de altura eleva su centro de masas desde 0,980 m hasta 2,05 m.

■ **Figura 2.88**

a ¿Qué velocidad de despegue vertical necesita el saltador para elevarse hasta la altura de la barra?
b Si el atleta tarda 0,22 en proyectarse hacia arriba, ¿cuál es la fuerza resultante media que actúa sobre él?
c ¿Qué fuerza ascendente ejerce el suelo sobre él?
d ¿Qué hace el atleta para que el suelo lo impulse hacia arriba?
e Utiliza la física para explicar por qué es conveniente que el atleta caiga sobre espuma en lugar de caer sobre suelo duro.

92 a Explica por qué una persona debería doblar las rodillas al caer cuando salta, aunque sea un salto desde muy poca altura.
b Explica el mecanismo por el cual las bolsas de aire (airbags) y/o los cinturones de seguridad reducen los daños a los pasajeros de un coche en caso de accidente.

93 Se tira una pelota de baloncesto de 0,62 kg de masa sobre una báscula de baño con una velocidad de impacto de $16\,m\,s^{-1}$ y se estima que la fuerza máxima es de 280 N.
a Si la fuerza media que se ejerce sobre la pelota es del orden de la mitad de la fuerza máxima, ¿cuál es la deceleración aproximada de la pelota?
b Estima cuánto tiempo está la pelota en contacto con la báscula antes de rebotar.

Tercera ley del movimiento de Newton

La tercera ley del movimiento de Newton trata de las fuerzas que actúan *entre* dos cuerpos. Siempre que dos objetos *cualesquiera* entran en contacto o interactúan de algún modo, ejercen fuerzas uno sobre otro (Figura 2.89), Las dos fuerzas deben tener *siempre* el mismo módulo; para decirlo de una manera más exacta, la fuerza que A ejerce sobre B es igual que la que ejerce B sobre A pero en sentido *opuesto*.

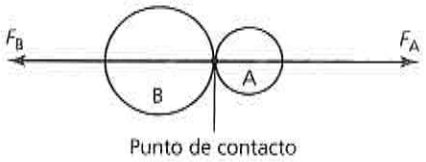


Figura 2.89
Cuando dos cuerpos interactúan $F_A = -F_B$

La **tercera ley del movimiento de Newton** afirma que siempre que un cuerpo ejerce una fuerza sobre un segundo cuerpo, este a su vez ejerce exactamente la misma fuerza sobre el primero, pero en sentido opuesto.

En esencia, esta ley afirma que las fuerzas *siempre* tienen que darse en pares, aunque es importante comprender que las dos fuerzas deben actuar sobre *distintos* cuerpos y en sentidos opuestos. Las dos fuerzas son siempre del mismo tipo, por ejemplo gravitatoria/gravitatoria o fricción/fricción. A veces esta ley se enuncia en la forma en que lo hacía Newton: «a toda fuerza de acción le corresponde una fuerza de reacción igual y de sentido opuesto». Para decirlo en términos actuales, es imposible empujar algo que no nos empuje a su vez. A continuación se enumeran algunos ejemplos:

- Si tiramos de una cuerda, la cuerda tira de nosotros.
- Si la Tierra tira de una persona, la persona tira de la Tierra (Figura 2.90).
- Si el puño golpea la mejilla, la mejilla golpea el puño (Figura 2.91).
- Si ejercemos una fuerza sobre el suelo, el suelo ejerce una fuerza sobre nosotros.
- Si un barco empuja el agua hacia abajo, el agua empuja el barco hacia arriba (Figura 2.92).
- Si el Sol atrae a la Tierra, la Tierra atrae al Sol.
- Si un avión empuja el aire hacia abajo, el aire empuja el avión hacia arriba.

Figura 2.90
La fuerza sobre la mujer es igual a la fuerza sobre la Tierra pero en sentido opuesto

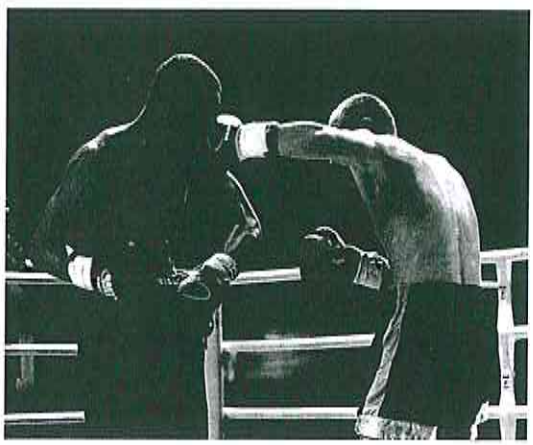
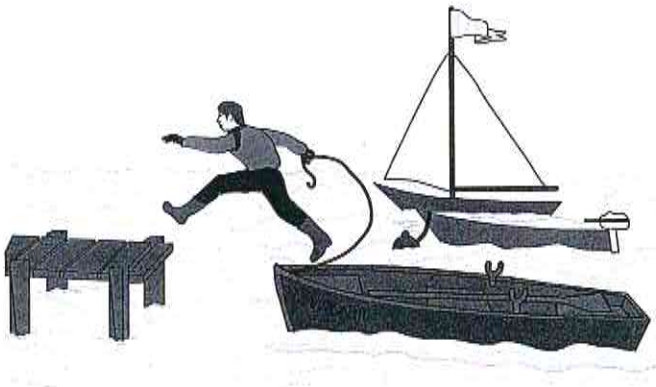
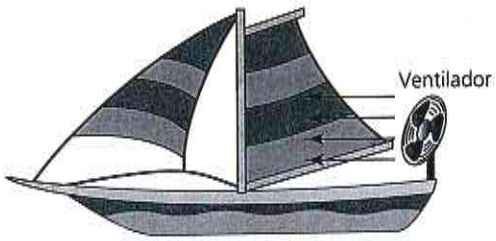


Figura 2.91
La fuerza sobre el guante es igual a la fuerza sobre la mejilla pero en sentido opuesto



■ **Figura 2.92**
La fuerza que empuja al hombre hacia delante es igual a la fuerza que empuja al barco hacia atrás

94 En la Figura 2.93 se sugiere un método para mover un barco de vela cuando no hay viento. Discute la efectividad de este método.



■ **Figura 2.93**

95 Un libro tiene un peso de 2 N y se encuentra en reposo sobre una mesa. La mesa ejerce una fuerza de reacción normal de 2 N hacia el libro. Explica por qué estas dos fuerzas no constituyen un ejemplo de la tercera ley de Newton.

96 Anteriormente se han enumerado siete ejemplos de pares de fuerzas que cumplen la tercera ley de Newton. Da tres ejemplos más. Intenta utilizar distintos tipos de fuerzas.

97 Colocamos sobre una báscula una jaula grande en cuyo interior hay un pájaro inmóvil sobre una percha. ¿Qué le ocurre al peso que indica la báscula cuando el pájaro está volando por la jaula (en comparación con cuando está inmóvil)? Razona tu respuesta.

Enlace con la teoría del conocimiento

Predeterminación

La física clásica sostenía que el futuro del universo se podía predecir a partir del conocimiento del estado presente. ¿Hasta qué punto el conocimiento del presente nos proporciona conocimiento del futuro?

Toda la materia está constituida por partículas. Se ha sugerido que si pudiéramos conocer completamente el estado actual de todas las partículas de un sistema (sus posiciones, energías, movimientos, etc.) tal vez podríamos utilizar las leyes de la física clásica para predecir qué les ocurriría a estas partículas en el futuro. Si estas ideas se pudieran ampliar para incluirlo todo, entonces el futuro del universo ya estaría decidido y **predeterminado**. Los diversos acontecimientos aparentemente impredecibles de la vida diaria y de la conducta humana (como tú mismo leyendo estas palabras en este preciso instante) no serían más que las leyes de la física disfrazadas.

Sin embargo, actualmente sabemos que las leyes de la física (como leyes imaginadas por seres humanos) no siempre están definidas con tanta precisión ni están comprendidas en su totalidad, tal como habían imaginado los primeros físicos. Los principios de la física cuántica contrastan en particular con las leyes de la física clásica. Además, en la práctica es totalmente inconcebible que podamos llegar a saber lo suficiente sobre el estado actual de la totalidad del universo con el objetivo de usar estos datos para realizar predicciones futuras detalladas.

2.3 Trabajo, energía y potencia

El concepto fundamental de energía es la piedra angular sobre la que se construye la ciencia

El concepto de energía es probablemente el concepto que más se utiliza en la ciencia, además de ser un término de uso habitual en el lenguaje diario. A pesar de ello, la idea de energía no es fácil de explicar o de definir, aunque se trate de un concepto muy útil.

Figura 2.94
Los perritos de juguete consiguen su energía de las pilas

Cuando ponemos una pila en un perrito de juguete (Figura 2.94), el perrito se mueve, salta y ladra. Al cabo de un rato, el juguete deja de funcionar. Para intentar *explicar* este fenómeno, ciertamente necesitamos recurrir al concepto de energía. La energía química de la pila se transforma en energía eléctrica, que a su vez se transforma en energía de movimiento mediante un pequeño motor. Parte de la energía también se transforma de energía eléctrica en sonido en un altavoz. Al final, toda la energía útil de la pila se ha transferido al entorno. El concepto «energía» permite explicar el fenómeno observado de una manera relativamente simple.

Podemos hablar de la energía «de» la gasolina que ponemos en el depósito del coche (por ejemplo) y continuar explicando que esta energía se transfiere al movimiento del coche. Pero en realidad no ha fluido nada desde la gasolina al coche; no es más que un modo conveniente de expresar la idea de que la combustión controlada de la gasolina con el oxígeno del aire puede hacer algo que consideramos útil.

Tal vez sea esta la manera más fácil de entender el concepto de energía: la energía se necesita para que ocurran las cosas. Siempre que *algo* cambia hay transferencia de energía de un lugar a otro o de una forma a otra. Y lo que es más importante, esta transferencia de energía se puede *calcular* y supone el «sistema de contabilidad» fundamental de la ciencia. La ocurrencia de un suceso cualquiera requiere una determinada cantidad de energía, y si no hay suficiente energía disponible el suceso no puede ocurrir. Por ejemplo, si no obtienes la energía suficiente (a partir de lo que comes) no podrás subir una colina de 500 m; si no pones suficiente gasolina en el coche no podrás llegar a donde quieres ir; si la energía de un calentador eléctrico no se transforma lo suficientemente rápido, la habitación no se mantendrá caliente cuando hace frío.

El cálculo de las transferencias de energía constituye una parte muy importante de la física, y comenzaremos con situaciones muy habituales en las que la energía se transfiere a los objetos para moverlos.

Trabajo realizado como transferencia de energía

Una forma muy habitual de transferencia de energía es la que se produce cuando se mueve (desplaza) un objeto mediante la aplicación de una fuerza. Esta energía se denomina trabajo (símbolo *W*, del inglés «Work»). En física la palabra «trabajo» tiene un significado muy preciso, distinto al que tiene en el lenguaje diario.

trabajo realizado = fuerza x desplazamiento en la dirección de la fuerza

Si la fuerza es constante y tiene la misma dirección que el movimiento podemos escribir:

$W = Fe$

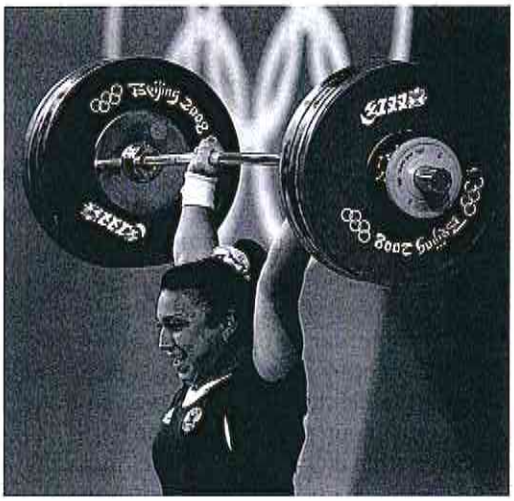
No obstante, en muchos ejemplos puede que no se cumpla uno de estos supuestos o incluso los dos.

La unidad del trabajo es el **julio**, J. Se define 1 J como el trabajo realizado cuando una fuerza de 1 N desplaza un objeto un espacio de 1 m en la dirección de la fuerza. La misma unidad se utiliza para medir *todas* las formas de energía; además, también se utilizan de forma habitual los múltiplos kilojulio (kJ) y megajulio (MJ).

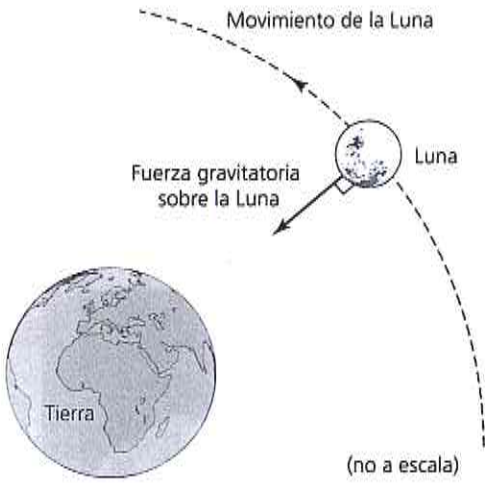
Tanto el trabajo como la energía son magnitudes escalares.

La levantadora de pesas de la Figura 2.95 *no* realiza ningún trabajo sobre las pesas que tiene sobre su cabeza mientras se mantiene inmóvil porque no hay desplazamiento. Pero sí se transfiere energía a sus músculos que, sin duda, le duelen.

Si el movimiento es perpendicular a la fuerza, esta no realiza ningún trabajo. Por ejemplo, la fuerza de la gravedad mantiene a la Luna en órbita alrededor de la Tierra (Figura 2.96), pero no se realiza ningún trabajo.



■ **Figura 2.95**
Esta levantadora de pesas no está realizando ningún trabajo



■ **Figura 2.96**
El mantenimiento en órbita de la Luna alrededor de la Tierra no supone ningún trabajo

Ejemplo resuelto

15 ¿Cuánto trabajo se realiza cuando se levanta una masa de 1,5 kg una altura de 80 cm?

La fuerza necesaria para levantar un objeto (a velocidad constante) es igual a su peso (mg) y el símbolo h se utiliza habitualmente para indicar distancias verticales.

$W = Fe$

$W = mg \times h$

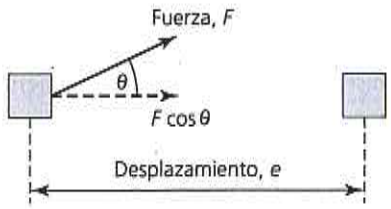
$W = 1{,}5 \times 9{,}81 \times 0{,}80$

$W = 12\,\text{J}$

Cálculo del trabajo realizado cuando la fuerza no está en la misma dirección que el desplazamiento

A veces el desplazamiento producido no está en la misma dirección que la fuerza (Figura 2.97). Por el motivo que sea, el objeto que se representa solo puede desplazarse en la dirección que indica la línea discontinua roja, pero la fuerza actúa en una dirección que forma un ángulo θ con esta línea.

■ **Figura 2.97**
Movimiento que no está en la misma dirección de la fuerza aplicada



Sabemos que el trabajo realizado = fuerza x desplazamiento en la dirección de la fuerza. En este caso la fuerza que se utiliza para calcular el trabajo realizado es la *componente* de F en la dirección del movimiento ($F \cos \theta$) de manera que:

$W = Fe \cos \theta$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Si la fuerza y el movimiento están en la misma dirección, cos θ vale 1 y la ecuación se convierte en $W = Fe$, como al principio. Si la fuerza es perpendicular al movimiento, entonces cos θ vale cero y no hay trabajo realizado.

Ejemplo resuelto

16 La caja de 150 kg que se muestra en la Figura 2.98 se desplaza 2,27 m horizontalmente sobre el suelo gracias a la acción de una fuerza de 248 N que tira de ella.

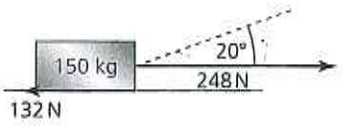


Figura 2.98

a ¿Cuánto trabajo realiza la fuerza?
b Si la fuerza de fricción es de 132 N, ¿cuál es la aceleración de la caja?
c Explica por qué sería más fácil desplazar la caja si se tirara de ella en la dirección que indica la línea discontinua.
d Cuando se tira de la caja con un ángulo de 20,0° respecto a la horizontal, la fuerza aplicada es de 204 N. Calcula el trabajo realizado por esta fuerza al desplazar la caja horizontalmente una distancia igual a la del enunciado.

a $W = Fe$

$W = 248 \times 2{,}27 = 563\,\text{J}$

b $a = \frac{F}{m}$

$a = \frac{(248 - 132)}{150}$

$a = 0{,}773\,\text{m s}^{-2}$

c Cuando se tira de la caja en esta dirección la fuerza tiene una componente vertical que contribuye a reducir la fuerza de reacción normal entre la caja y el suelo. Esto reduce a su vez la fricción que se opone al movimiento horizontal.

d La fuerza no actúa en la misma dirección del movimiento. Para calcular el trabajo realizado necesitamos utilizar la componente horizontal de la fuerza de 204 N.

$W = F\cos 20{,}0° \times e$

$W = 204 \times 0{,}940 \times 2{,}27$

$W = 435\,\text{J}$

98 Calcula el trabajo realizado cuando:
a se tira de una maleta de 12 kg con una fuerza de 54 N y la maleta recorre 1,1 m por el suelo
b se levanta la misma maleta a una altura de 1,1 m.

99 La fuerza que empuja el cochecito de la Figura 2.99 no está en la misma dirección del movimiento. Calcula el trabajo realizado cuando se desplaza el cochecito 90 cm hacia la derecha mediante una fuerza de 36 N que forma un ángulo de 28° con la horizontal.

Figura 2.99

100 El jardinero de la Figura 2.100 está empujando una máquina cortacésped a una velocidad constante de 0,85 m s^{-1} con una fuerza, *P*, de 70 N que forma un ángulo de 40° con el suelo.

a Calcula la magnitud de la fuerza de fricción, *F*.

b ¿Cuánto trabajo se realiza al desplazar la máquina cortacésped durante 3 s?

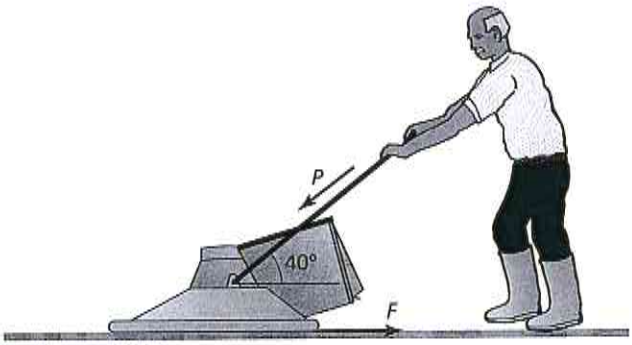


Figura 2.100

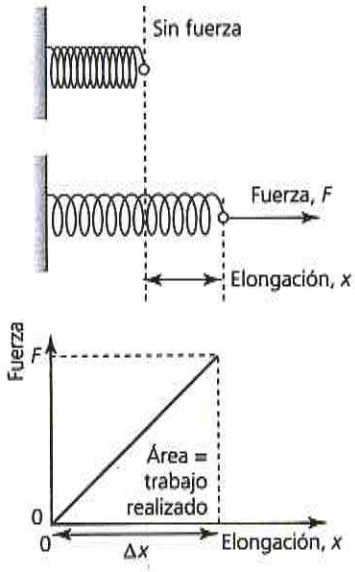


Figura 2.101
Fuerza y elongación cuando estiramos un muelle

Cálculo del trabajo realizado por una fuerza variable

Cuando efectuamos cálculos utilizando la ecuación $W = Fe \cos \theta$ el valor de la fuerza debe ser constante pero, en la realidad, esto ocurre muy pocas veces. Para calcular el trabajo realizado por una fuerza *variable* tenemos que hacer primero una estimación del *valor medio* de la fuerza. En algunas situaciones podemos suponer que la fuerza varía de forma predecible y lineal, de modo que su valor medio se encuentra a medio camino entre la fuerza inicial y la fuerza final. El cálculo del trabajo realizado al estirar un muelle puede ser un buen ejemplo de esta situación (Figura 2.101). Suponiendo que el muelle no se haya estirado por encima de su límite de elasticidad, la fuerza aplicada es proporcional a la elongación (desplazamiento del extremo del muelle), tal como se muestra en la gráfica fuerza–elongación. (Esta relación se conoce como *ley de Hooke*).

El uso de la ecuación $W = Fe$ en esta situación implica el uso de la fuerza *media* durante la elongación del muelle. Cuando el muelle se alarga, la fuerza aumenta linealmente desde cero hasta *F* y su valor medio es *F*/2. El trabajo realizado, *W*, es $(F/2) \times \Delta x$. (El símbolo *x* se utiliza normalmente para representar la elongación y Δx se utiliza para representar un cambio en la elongación).

El resultado de este cálculo es *siempre* idéntico al del área sombreada de la gráfica. Si conocemos cómo varía la fuerza respecto al desplazamiento podemos dibujar una curva fuerza–desplazamiento y entonces:

El área bajo la curva fuerza–desplazamiento (distancia) equivale al trabajo realizado.

La utilidad de la determinación del trabajo realizado a partir del área bajo la curva se ve más claramente cuando consideramos el estiramiento de un material como el caucho, para el que el desplazamiento *no* es proporcional a la fuerza. Normalmente el caucho se vuelve más rígido a medida que se estira. En la Figura 2.102 se muestra una posible curva fuerza–elongación (desplazamiento) para el caucho.

El trabajo realizado, *W*, para estirar el caucho 40 cm (por ejemplo) se puede calcular a partir del área bajo la curva. Esta área, a su vez, se puede estimar a partir del triángulo sombreado que, a ojo, tiene un área similar:

$W = 0{,}5 \times 50 \times 0{,}40 = 10\,\text{J}$

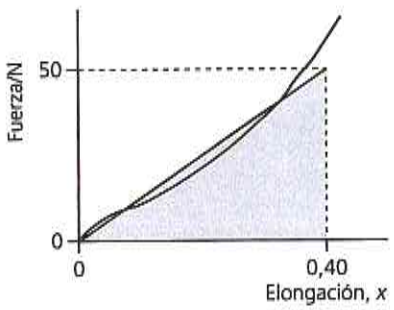


Figura 2.102
Curva fuerza–elongación (desplazamiento) para un material de caucho sometido a tensión

Ejemplo resuelto

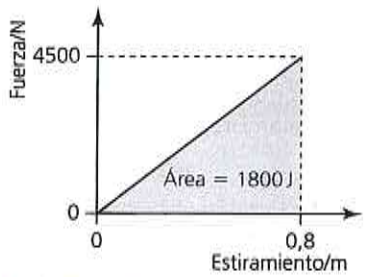
17 a El centro de gravedad de un saltador de cama elástica de masa 73 kg se eleva una altura vertical de 2,48 m cuando salta (véase Figura 2.103). Calcula el trabajo realizado.

b Cuando el saltador cae sobre la cama elástica tras el salto, descansa un momento antes de impulsarse hacia arriba de nuevo. Si el desplazamiento máximo (estiramiento) de la cama elástica es 0,8 m, dibuja esquemáticamente una curva fuerza–desplazamiento para la superficie de la cama elástica.

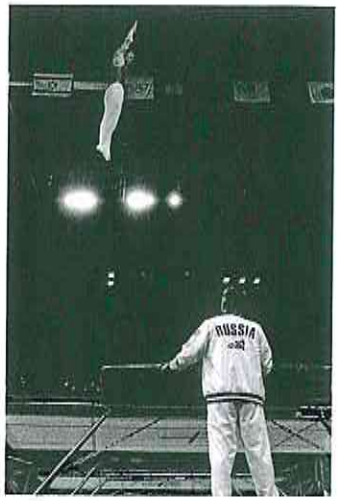
a $W = Fe$ = peso x altura = $mg \times h$

$W = 73 \times 9{,}81 \times 2{,}48 = 1800\,J$

b La forma de la curva es desconocida, de manera que se ha dibujado de forma lineal por simplicidad (Figura 2.104). El área bajo la curva debe ser aproximadamente igual a 1 800 J (sin tener en cuenta la transferencia hacia otras formas de energía). Esto implica que la fuerza máxima debe ser de unos 4500 N, de manera que 0,5 x 0,8 x 4 500 = 1 800 J.



■ **Figura 2.104**



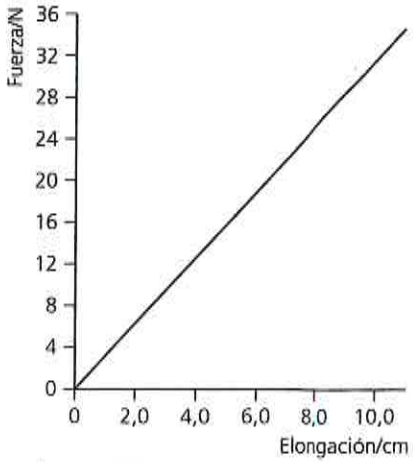
■ **Figura 2.103**
Cuanto más se estira la cama elástica, más alto puede saltar el saltador

101 Cuando no se le aplica ninguna fuerza, un muelle tiene una longitud de 48 mm. Cuando se le aplica una fuerza de 8,3 N su longitud total se alarga hasta 74 mm. ¿Cuánto trabajo se ha realizado sobre el muelle (suponiendo que obedece la ley de Hooke)?

102 Algunos muelles están diseñados para comprimirse, además de estirarse. El sistema de suspensión de un coche es un buen ejemplo de ello.
- a Estima el valor de la máxima fuerza que puedes ejercer sobre un coche y el máximo desplazamiento que experimentará el coche como consecuencia de tu fuerza.
- b Calcula aproximadamente el trabajo realizado sobre los muelles del sistema de suspensión.

103 Una tira fina de plástico se estira al colgarle masas de 100 g en su extremo. Cuando la masa total que cuelga de la tira es menor de 0,800 kg, la elongación de la tira es proporcional a la fuerza de estiramiento. Cuando la masa que cuelga es exactamente 0,800 kg, la elongación de la tira es de 14 cm. A medida que se le cuelga más masa, el plástico se vuelve más flexible pero acaba rompiéndose cuando la masa total que cuelga de él es de 1,2 kg y se ha alargado hasta 30 cm, sin recuperar ya su forma original.
- a Esboza una curva fuerza–distancia que represente el comportamiento de la tira de plástico.
- b Estima el trabajo total realizado para estirar el plástico:
  - i 14 cm
  - ii 30 cm.
- c Sugiere qué le ocurre a la energía transferida durante el estiramiento del plástico.

104 Una pendiente escarpada en una curva fuerza–elongación (F–e) significa que se necesita una fuerza mayor para alargar el muelle una determinada cantidad. En otras palabras, la pendiente de la curva fuerza–elongación representa la *elasticidad* del muelle. $\Delta F/\Delta e$ es lo que se conoce como *constante de elasticidad* del muelle, pero un concepto similar se puede aplicar al estiramiento de otros materiales, no necesariamente muelles.
- a Calcula la constante de elasticidad del muelle representado en la Figura 2.105.
- b ¿Cuál es el trabajo realizado para alargar el muelle 8,0 cm?
- c Si la longitud original del muelle es de 27,0 cm, ¿cuál será su longitud si se le aplica una fuerza de 19 N?
- d Explica por qué no sería una buena idea utilizar la información de esta gráfica para predecir la longitud del muelle si se le cuelga de su extremo una masa de 10 kg.



■ **Figura 2.105**

Perspectivas adicionales

Fuerza y elongación: esfuerzo y deformación

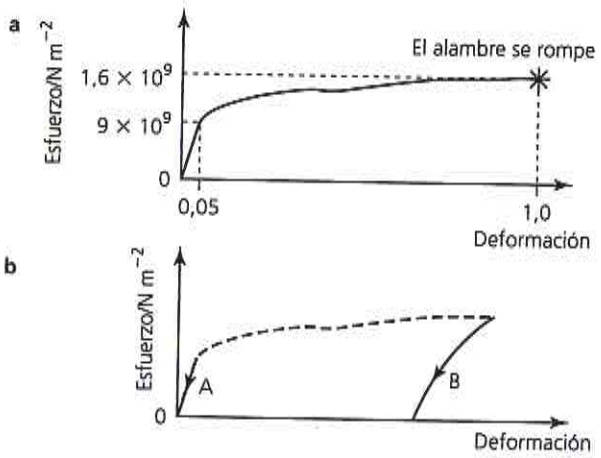
Se pueden representar curvas de fuerza–elongación para muestras de distintos materiales (normalmente en forma de alambre). Estas curvas proporcionan una importante información básica sobre la *elasticidad* y la *resistencia* de la muestra que se está examinando, así como su posible deformación y su capacidad para almacenar energía cuando está siendo sometida a estiramiento. Evidentemente todas estas características no solo dependen del material del que está hecha la muestra sino también de su longitud original y su sección transversal. Sin embargo, si en lugar de trabajar con curvas de fuerza–desplazamiento lo hacemos con curvas de esfuerzo y deformación, los resultados pueden aplicarse a muestras de un mismo material pero con *cualquier* forma.

$$\text{esfuerzo} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}} \qquad \text{deformación} = \frac{\text{cambio en la longitud}}{\text{longitud original}}$$

Como ejemplo consideremos la Figura 2.106a, en la que se muestra la relación de esfuerzo–deformación para un alambre hasta el momento en que se rompe.

A partir de esta gráfica podemos establecer las conclusiones siguientes sobre este metal:

- Para deformaciones hasta de 0,05 (5%) aproximadamente, cualquier elongación producida es proporcional a la fuerza aplicada (el esfuerzo es proporcional a la deformación).
- Cuando el esfuerzo aumenta, el metal se vuelve menos elástico.
- Cuando el metal se rompe, su longitud es aproximadamente el doble de la longitud original.
- El trabajo realizado para estirar el material se puede calcular a partir del área bajo la curva (si se conocen las dimensiones del alambre).



■ **Figura 2.106** *Gráfica de esfuerzo–deformación*

En la Figura 2.106b podemos ver lo que le ocurre al mismo metal cuando *se deja de aplicar* la fuerza sobre él en dos situaciones distintas. En A la fuerza máxima sobre el alambre no lo lleva más allá de su límite de proporcionalidad y el alambre retorna a su forma original. Es lo que se denomina «comportamiento elástico».

En B, el alambre se ha seguido estirando durante más tiempo antes de que se haya dejado de aplicar la fuerza y queda permanentemente deformado. Es lo que se conoce como comportamiento «plástico».

1 **a** Si la longitud original del alambre es 1,20 m y su sección transversal es $3{,}8 \times 10^{-8}\,m^2$, calcula la fuerza necesaria para romper el alambre y su longitud justo antes de romperse.

b Estima la fuerza necesaria para romper otro alambre del mismo metal de longitud 2,4 m.

2 Calcula el cociente esfuerzo/deformación para la sección lineal de la gráfica. Este cociente es la elasticidad del metal. ¿Cuáles son las unidades de la elasticidad?

3 ¿Cuánto trabajo se ha realizado aproximadamente para estirar este alambre hasta su punto de ruptura?

Distintas formas de energía

Cuando algo ocurre (es decir, algo cambia) es porque ha habido una transferencia de energía desde una forma de energía a otra, o desde un lugar a otro. Es importante que tengamos una idea general de cuáles son las principales formas de energía. En esta sección introduciremos brevemente las siguientes:

- energía (potencial) gravitatoria
- energía (potencial) nuclear
- energía (potencial) química
- energía (potencial) eléctrica y energía transferida mediante una corriente eléctrica
- energía (potencial) de deformación elástica
- energía térmica (calor)
- energía radiante
- energía cinética (incluyendo la energía eólica)
- energía interna
- energía debida a ondas mecánicas (incluyendo las ondas acústicas y las ondas acuáticas).

(Aunque no forma parte de los contenidos de este capítulo, es interesante recordar que cualquier masa tiene un contenido de energía equivalente a su magnitud. La masa y la energía están relacionadas por la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$. Esta ecuación se explica en el Capítulo 7).

Energías potenciales

Cuando efectuamos un trabajo para estirar un muelle (véase Figura 2.101), decimos que hemos transferido energía al muelle y que esta energía transferida se encuentra en forma de energía (de deformación) potencial elástica. (Comportamiento **elástico** significa que el material vuelve a su forma original cuando se deja de aplicar la fuerza sobre él. Cuando decimos que el material se ha **deformado** significa que ha cambiado de forma). Cuando estiramos un muelle podemos afirmar que se «almacena» energía en su interior y que esta energía está disponible para su uso posterior, posiblemente para algo útil como hacer funcionar un juguete o un reloj de cuerda. La energía potencial elástica es solo una más entre las muchas formas de energía potencial.

Las **energías potenciales** son energías almacenadas. En general, existe energía potencial cuando hay fuerzas entre los objetos. A continuación se enumeran distintas energías potenciales, todas ellas importantes:

- Cuando levantamos una masa en contra de la ley de la gravedad decimos que la masa ha ganado **energía potencial gravitatoria**. Esta energía se almacena en la masa. Si la masa se deja caer pierde energía potencial gravitatoria, que puede ser transferida para realizar algo útil.
- La **energía (potencial) nuclear** está asociada a las fuerzas existentes entre las partículas de los núcleos de los átomos.
- La **energía (potencial) química** está asociada a las fuerzas existentes entre los electrones y otras partículas atómicas y moleculares.
- La **energía (potencial) eléctrica** está asociada a las fuerzas entre las cargas eléctricas.
- La **energía (potencial) de deformación elástica** está asociada a las fuerzas necesarias para cambiar la forma de los objetos.

Energía cinética

Para mover un objeto que está en reposo o para moverlo más rápidamente hay que efectuar un trabajo. Esto significa que todos los objetos que están en movimiento tienen una forma de energía, que se denomina **energía cinética**. («Cinética» significa relativa al movimiento). La energía eólica es la energía cinética del aire en movimiento.

Energía transferida

Cuando decimos que se transfiere energía de un lugar a otro, podemos estar refiriéndonos a las formas de energía siguientes:

- **energía eléctrica** transportada por una corriente eléctrica
- **energía térmica** (calor) transferida como consecuencia de una diferencia de temperatura

- **energía radiante** transferida por ondas electromagnéticas (la «energía luminosa» o la «energía solar» son ejemplos específicos de energía radiante electromagnética)
- las **ondas mecánicas** (como las ondas acuáticas y las ondas acústicas) implican la oscilación de masas y combinan energía cinética y energía potencial (véase Capítulo 4).

Energía interna

Dentro de una sustancia hay una gran cantidad de energía que proviene de los movimientos aleatorios de las partículas que contiene y de las fuerzas de interacción entre estas partículas. La **energía interna** de una sustancia es la suma de la energía cinética aleatoria total más la energía potencial eléctrica total del conjunto de partículas que contiene la sustancia.

Cuando los objetos se mueven en situaciones cotidianas, parte o la totalidad de su energía cinética se transforma en energía interna a causa de las fuerzas de fricción (y como consecuencia se desprende energía térmica al entorno).

Ejemplos de transferencia de energía

Todo lo que ocurre en nuestras vidas comporta transferencias de energía, por tanto, no hay que buscar demasiado lejos para encontrar ejemplos. Cuando encendemos un ventilador, la energía procedente de la corriente eléctrica se transforma en energía cinética del ventilador que, a su vez, se transforma en movimiento del aire. Cuando apagamos el ventilador, toda la energía se habrá desprendido al entorno en forma de energía térmica y después energía interna. Pero, ¿de dónde obtiene la energía la corriente eléctrica? Tal vez en una central eléctrica cercana la energía térmica del petróleo se transforma en energía interna y energía cinética del vapor, que se convierte a continuación en energía cinética en las turbinas que generan la electricidad.

La mayor parte de la energía que utilizamos en nuestro planeta proviene del Sol. La energía nuclear de los núcleos de hidrógeno del Sol se convierte en energía interna y radiación. La radiación solar que llega a la Tierra se transforma en energía química en las plantas (y después en los animales). El petróleo proviene de los restos de plantas y pequeños organismos que vivieron hace millones de años y que se han descompuesto en ausencia de oxígeno.

Ejemplo resuelto

18 Describe las transferencias de energía que se producen cuando se cuelga una masa verticalmente del extremo de un muelle metálico, que puede moverse arriba y abajo (oscilar) libremente, hasta que deja de moverse.

Cuando se comprime o se estira un muelle hay cambios en la energía potencial elástica. Cuando la masa se desplaza hacia arriba o hacia abajo hay transferencias de energía potencial gravitatoria. Cuando el muelle y la masa pierden energía potencial, la masa gana energía cinética. Cuando la energía cinética se vuelve a transformar en energía potencial, la masa pierde energía cinética. Parte de la energía se transfiere continuamente al entorno en forma de energía térmica, de modo que al cabo de un tiempo el movimiento se detiene.

105 Dibuja un diagrama de flujo donde se representen todas las transferencias de energía que se enumeran en el párrafo anterior.

106 Nombra aparatos cuyo cometido principal consista en llevar a cabo las transformaciones de energía siguientes:

a electricidad a sonido
b energía química a electricidad
c energía nuclear a electricidad
d sonido a electricidad
e energía química a radiación electromagnética
f energía química a energía cinética
g deformación elástica a energía cinética
h energía cinética a electricidad
i energía química a energía interna
j radiación electromagnética a electricidad.

Principio de conservación de la energía

El estudio de las distintas formas de energía y sus transferencias es un tema central de la física. El principal motivo por el que el concepto de energía es tan importante radica en el principio de conservación de la energía. («Conservar» significa mantener igual).

El principio de conservación de la energía afirma que la energía no se puede crear ni destruir; solo se puede transferir de una forma a otra.

En otras palabras, la cantidad total de energía del universo es constante. Se trata probablemente del principio más importante de la ciencia. Si en una determinada situación parece que la energía simplemente ha aparecido o desaparecido, sabemos que debe existir algún tipo de explicación del lugar de donde viene o el lugar a donde va. Es conveniente remarcar que todos los procesos cotidianos desprenden (disipan) algo de energía al entorno y que, aunque esta energía disipada ya no sea útil, no por ello ha «desaparecido».

La aplicación del principio de conservación de la energía exige poder medir y calcular transferencias de energía. Todos los estudiantes de física deben conocer las ecuaciones para calcular cantidades de energía en todas sus formas (véase el apartado siguiente).

Naturaleza de la ciencia

La importancia de la conservación de la energía

A pesar de su considerable importancia y de su gran alcance, el principio de la conservación de la energía no puede ser verificado directamente mediante experimentos individuales. Demostrar que un principio físico (ley/teoría) es *siempre* cierto, para *cualquier* proceso, en *cualquier* lugar y en *cualquier* momento es simplemente imposible. Todos los procesos mecánicos disipan energía hacia el entorno, por tanto resulta difícil cuantificar hacia dónde va la energía. Así, es comprensible que se haya tardado tantos años en establecer completamente el principio de conservación de la energía. Sin embargo, una vez establecido no hay ningún experimento que lo haya contradicho, aunque el concepto original de energía se ha tenido que adaptar y ampliar a lo largo del tiempo para incluir el calor y la masa.

Cálculo de energías mecánicas

Energía potencial gravitatoria

Cuando alzamos una masa le transferimos energía y, como estamos ejerciendo una fuerza para desplazarla, este tipo de energía se puede describir como un ejemplo de trabajo realizado. Ya hemos visto (en el Ejemplo resuelto 17) que podemos calcular este trabajo realizado mediante la expresión $W = mgh$. La diferencia de energía asociada a una masa, por el hecho de que se haya realizado un trabajo para desplazarla hacia arriba o hacia abajo hasta una nueva posición, se denomina *cambio en* la energía potencial gravitatoria (Figura 2.107).

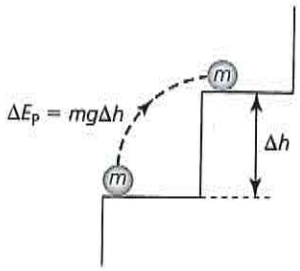


Figura 2.107
Esta masa está ganando energía potencial gravitatoria

El símbolo E se utiliza para representar la energía en general, y el símbolo E_p para representar la energía potencial gravitatoria en particular. Cuando levantamos una masa m una altura vertical h (como se muestra en la Figura 2.107), podemos calcular el cambio en la energía potencial gravitatoria, E_p, mediante la ecuación:

$$\Delta E_P = mg\Delta h$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Fíjate en que esta ecuación nos permite calcular cambios en la energía potencial gravitatoria entre diversas posiciones. Si quisiéramos calcular la energía gravitatoria «total» de una masa, tendríamos que responder primero a la pregunta: ¿energía potencial gravitatoria en comparación con qué? La respuesta podría ser con el suelo, el nivel del mar o el centro de la Tierra, por poner un ejemplo. Hablaremos de ello más adelante, en el Capítulo 10.

Ejemplo resuelto

19 ¿Cuánta energía potencial gravitatoria se gana en cada una de estas situaciones?

a Levantar un libro de 818 g a una altura de 91 cm, desde el suelo a un escritorio.

b Un muchacho de 59 kg sube 18 escalones de 14 cm de altura cada uno para subir del primer al segundo piso de un edificio.

c El mismo muchacho baja del segundo piso al primero.

a $\Delta E_p = mg\Delta h$

$\Delta E_p = 0{,}818 \times 9{,}81 \times 0{,}91$

$\Delta E_p = 7{,}3\,J$

b $\Delta E_p = mg\Delta h$

$\Delta E_p = 56 \times 9{,}81 \times (18 \times 0{,}14)$

$\Delta E_p = 1400\,J$

c $-1400\,J$

El signo negativo indica que la energía potencial gravitatoria es menor que en el segundo piso.

107 **a** ¿Cuál es la diferencia de energía potencial gravitatoria de un escalador de 74 kg entre la cima y la base de una montaña de 2800 m de altura?

b ¿Es igual la intensidad del campo gravitatorio en la cima y en la base de la montaña? Si no es igual, ¿afecta a la respuesta del apartado a?

108 Un teleférico recorre una distancia de 6 km a una altura de 700 m (Figura 2.108).

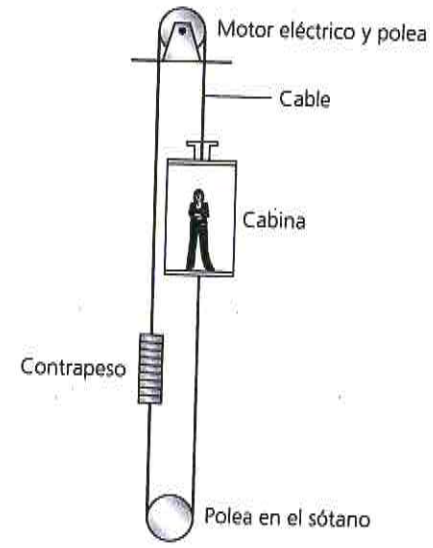
■ **Figura 2.108** *Teleférico de Ngong Ping en Hong Kong*

a ¿Cuánta energía potencial gravitatoria se debe transferir al funicular de masa 1800 kg durante el trayecto, si lleva ocho pasajeros con una masa media de 47 kg cada uno?

b En realidad la transferencia de energía para recorrer el trayecto ha de ser mucho mayor que la que has calculado en el apartado a. Intenta explicarlo.

109 **a** ¿Cuánta energía gravitatoria se transfiere a un ascensor de masa total 2340 kg cuando sube 72 pisos con una altura media de 3,1 m cada uno?

b Cuando vuelve a bajar, se transfiere la misma cantidad de energía potencial gravitatoria desde el ascensor. Los ascensores utilizan contrapesos (véase Figura 2.109). Cuando el ascensor baja, el contrapeso sube y viceversa. Explica la ventaja de este sistema. Las vías de funicular normalmente llevan dos vagones: mientras uno sube, el otro baja.



■ **Figura 2.109**
Un ascensor y su contrapeso

Energía cinética

Consideremos una masa m que es acelerada uniformemente desde el estado de reposo por una fuerza, F, que actúa en la dirección del movimiento a lo largo de una distancia e. El trabajo realizado se puede calcular mediante $W = Fe$. Pero $F = ma$ y $v^2 = u^2 + 2ae$ (con $u = 0$), por tanto la ecuación anterior se puede reescribir:

$$W = Fe = ma \times \frac{v^2}{2a} = \frac{1}{2}mv^2$$

Es decir, la energía cinética de una masa en movimiento, E_c, se puede calcular a partir de:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

20 Calcula la energía cinética de un coche de masa 1320 kg que viaja a 27 m s^{-1}.

$E_c = \frac{1}{2}mv^2$

$E_c = \frac{1}{2} \times 1320 \times 27^2$

$E_c = 4{,}8 \times 10^5$ J

110 **a** Calcula la energía cinética de:
i una pelota de fútbol (masa 440 g) que adquiere una velocidad de 24 m s^{-1} después de un puntapié
ii una bala de 24 g que se mueve a 420 m s^{-1}.
b Estima la energía cinética de una velocista femenina en una carrera olímpica de 100 m lisos.

111 Una masa de 2,4 kg en movimiento tiene una energía cinética de 278 J. ¿Cuál es su velocidad?

112 La masa de un electrón es $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg. Si se desplaza al 1% de la velocidad de la luz, ¿cuál es su energía cinética? (Velocidad de la luz = $3{,}00 \times 10^8$ m s^{-1})

113 Un coche que viaja a 10 m s^{-1} tiene una energía cinética de 100 kJ. Si su velocidad aumenta hasta 30 m s^{-1}, ¿cuál es su nueva energía cinética?

Energía potencial elástica

En la Figura 2.101 y la Figura 2.102 se representan las curvas fuerza–elongación correspondientes al estiramiento de un muelle u otro material; el área bajo la curva equivale al trabajo realizado por la fuerza durante el estiramiento (energía transferida).

Si el muelle (o el material que sea) se estira de forma elástica, cuando se deja de aplicar la fuerza recupera su forma y la energía transferida de nuevo se puede utilizar para hacer algo útil. Esta energía almacenada se denomina *energía potencial elástica* y, tal como se explicó anteriormente, equivale al área bajo la curva. El concepto de energía potencial elástica es especialmente útil para explicar el comportamiento y la utilidad de los muelles y del caucho.

Si la fuerza de estiramiento, F, es proporcional a la elongación, x, como se muestra en la Figura 2.101, entonces el gradiente

$$\frac{F}{\Delta x} = \text{constante}, k$$

donde k se conoce como **constante de fuerza** del muelle (o el material que sea). A veces también se utiliza el término «constante elástica del muelle». Las unidades de k son N m^{-1} (o N cm^{-1}). Un valor elevado de la constante de fuerza significa que el muelle/material es más rígido (se necesita más fuerza para producir la misma elongación). Una constante de fuerza elevada se representa mediante una curva más escarpada.

Consideremos de nuevo la curva de la Figura 2.101, en la que la fuerza es proporcional a la elongación y una fuerza F produce una elongación Δx. La ecuación para la energía potencial elástica, E_p, se puede determinar considerando el área del triángulo bajo la curva hasta aquel punto:

$$E_p = \frac{1}{2}F\Delta x$$

y como:

$$F = k\Delta x$$

$$E_P = \frac{1}{2}k\Delta x^2$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física.*

Esta ecuación no se puede utilizar si la fuerza *no* es proporcional a la elongación, pero en este caso la energía transferida se puede calcular a partir de una estimación del área. Sin embargo, la energía potencial elástica útil suele estar asociada a un estiramiento proporcional, como el de un muelle que no se ha estirado tanto como para superar su capacidad elástica. Las curvas fuerza–elongación no lineales normalmente representan materiales que no vuelven a su forma original cuando se deja de aplicar la fuerza, de manera que gran parte de la energía que ha sido transferida en el proceso de estiramiento ya no puede ser almacenada y recuperada posteriormente. (La energía tiende a calentar el material). El caucho constituye una importante excepción (véase la Figura 2.102).

Ejemplo resuelto

21 Cuando se aplica una fuerza de 38,2 N a un muelle de acero, su longitud aumenta linealmente desde 23,7 cm hasta 34,1 cm.

a Calcula la constante de fuerza del muelle.

b Calcula la longitud del muelle si la fuerza se reduce hasta 22,4 N.

c Calcula el valor de la elongación producida por una fuerza de 50,0 N. ¿Por qué es poco fiable tu respuesta?

d ¿Cuánta energía potencial elástica se almacena en el muelle:

i cuando su elongación es de 5,9 cm?

ii cuando la fuerza es de 7,6 N?

e Explica por qué cuando se duplica la fuerza de estiramiento la consecuencia es que la energía potencial elástica almacenada se cuadriplica.

a $k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{38,2}{(0,341 - 0,237)} = 367\,\text{N m}^{-1}$

b $\Delta x = \frac{F}{k} = \frac{22,4}{367} = 0,0610\,\text{m}$

Si añadimos este valor a la longitud original (antes del estiramiento) de 0,237 m, la longitud total es de 0,298 m.

c $\Delta x = \frac{F}{k} = \frac{50,0}{367} = 0,136\,\text{m}$

Este valor es poco fiable porque no sabemos si la elongación del muelle todavía es proporcional a esta fuerza (tiene mayor intensidad que la de la pregunta original).

d $E_p = \frac{1}{2}k\Delta x^2$

$= \frac{1}{2} \times 367 \times 0,059^2 = 0,64\,\text{J}$

e $x = \frac{F}{k} = \frac{7,6}{367} = 0,021\,\text{m}$

$= \frac{1}{2} \times 367 \times 0,021^2 = 0,081\,\text{J}$

f Si la elongación es proporcional a la fuerza, cuando duplicamos la fuerza también se tiene que duplicar la elongación.

114 Describe (incluyendo un diagrama apropiado) cómo realizarías un experimento para determinar la constante de fuerza de un muelle.

115 **a** Si un muelle tiene una constante de fuerza de 134 N m^{-1}, ¿qué elongación produce una fuerza de 10 N sobre el muelle? (Supón que el muelle no se estira por encima de su capacidad elástica.)

b ¿Cuánta energía potencial elástica se almacena en el muelle con esta fuerza?

c ¿Qué fuerza habría que aplicar al muelle para que almacenara una energía potencial elástica de 1,51 J?

116 Estima la cantidad de energía potencial elástica que se almacena en el sistema de suspensión de un coche cuando se montan en él los cuatro miembros de una familia.

Aplicaciones

Facilitar el trabajo

Cuando levantamos un objeto (verticalmente) la cantidad de energía (potencial gravitatoria) que necesitamos transferirle viene dada únicamente por su peso y por la altura vertical (*mgh*). Por ejemplo, para levantar una masa de 100 kg a una altura de 1 m hace falta realizar un trabajo de unos 1000 J. Aunque no se trata de un trabajo excesivo en cuanto a cantidad, no significa que podamos realizarlo fácilmente.

Existen dos razones principales por las que este trabajo podría ser difícil. En primer lugar, es posible que no podamos transferir esta cantidad de energía en el tiempo requerido para realizar el trabajo. Diciéndolo de otro modo, es posible que no seamos lo suficientemente *potentes*. (El concepto de potencia se trata más adelante en este capítulo). En segundo lugar, puede que no seamos lo bastante *fuertes* porque no somos capaces de proporcionar la fuerza ascendente necesaria de unos 1000 N. Potencia y fuerza son dos conceptos que se confunden en el lenguaje habitual.

El levantamiento de pesos (pesados) es una actividad humana muy habitual, de modo que hace ya muchos años que se han inventado diversos tipos de «máquinas» simples para facilitar este tipo de trabajos reduciendo la fuerza necesaria para llevarlos a cabo. Estas máquinas son la rampa (*plano inclinado*), la *palanca* y la *polea* (Figura 2.110).

■ **Figura 2.110**
Máquinas simples

En todas estas máquinas simples se reduce la fuerza necesaria para realizar el trabajo a costa de desplazar la fuerza. Si no hubiera pérdidas de energía (prácticamente todas son debidas a la fricción) el trabajo realizado por la fuerza (*Fe*) equivaldría a la energía útil transferida al objeto que está siendo levantado (*mgh*). Como en la práctica hay pérdidas de energía, tenemos que transferir más energía utilizando una máquina que levantando directamente el peso sin ella. Pero esto no es problema porque normalmente nos preocupa más la facilidad a la hora de realizar el trabajo que la energía total necesaria o la eficiencia del proceso.

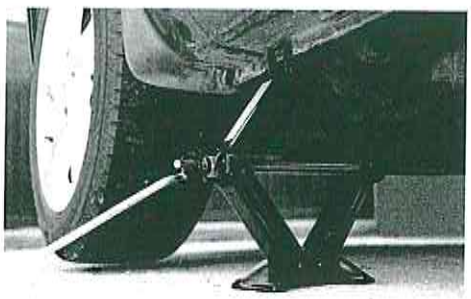
1 En la Figura 2.111 se muestra un gato levantando el lateral de un coche.

a Estima cuánta energía gravitatoria se le debe transferir al coche para cambiar un neumático.

b Si se cambia el diseño del gato en teoría es posible levantar el coche sin hacer apenas fuerza. Estima un valor de la fuerza que todo el mundo estaría dispuesto a hacer para levantar un coche con un gato.

c Utiliza las respuestas a los apartados **a** y **b** para estimar cuánto se debe desplazar la fuerza para levantar el coche.

d Explica cómo se puede desplazar la fuerza a una distancia mayor.



■ **Figura 2.111**
Cambio de un neumático utilizando una máquina simple (gato)

e Razona si puede ser útil que haya mucha fricción cuando se utiliza un gato para levantar un coche.

Transferencias mecánicas de energía

Hasta ahora en este capítulo hemos introducido importantes ecuaciones para cuatro tipos distintos de energía mecánica:

- Trabajo realizado (energía transferida) cuando una fuerza desplaza un objeto:
  $W = Fe$
- Energía cinética de un objeto en movimiento:
  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$

- Cambios en la energía potencial gravitatoria cuando un objeto se mueve hacia arriba o hacia abajo:

  $\Delta E_P = mg\Delta h$

- Energía potencial elástica cuando algo es deformado elásticamente:

  $E_P = \frac{1}{2}k\Delta x^2$

Cuando se produce un cambio en el movimiento de un objeto se produce una transferencia energética entre estas cuatro formas de energía, de modo que podemos igualar las ecuaciones apropiadas para predecir qué ocurrirá, tal como se muestra en los ejemplos siguientes. Para ello necesitamos suponer que no se produce transferencia hacia otras formas de energía (como energía térmica o energía interna). Es decir, debemos considerar que la fricción y/o la resistencia del aire son despreciables.

1 Energía potencial gravitatoria/energía cinética

Cuando un objeto cae hacia el suelo se produce una transformación de energía potencial gravitatoria en energía cinética. Cuando lanzamos o proyectamos un objeto verticalmente hacia arriba hemos de suministrarle energía cinética, que se transforma a continuación en energía potencial gravitatoria. En el punto más alto de la trayectoria, la energía cinética del objeto será cero y la energía potencial gravitatoria será máxima.

Supongamos que un objeto de masa m cae desde un estado de reposo y se mueve a través de una altura vertical, h, sin resistencia del aire. Podemos escribir:

$$\Delta E_P = E_c$$

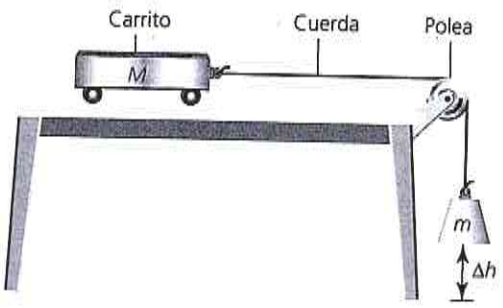
$$mg\Delta h = \frac{1}{2}mv^2_{max}$$

y en consecuencia:

$$v^2_{max} = 2g\Delta h$$

Esta útil ecuación equivale a la ecuación del movimiento: $v^2 = u^2 + 2ae$, con $u = 0$, $a = g$ y $e = h$. La misma ecuación se puede utilizar para un objeto que se mueve hacia arriba. También se puede utilizar para objetos que suben o bajan por una pendiente (sin rodar), pero siempre suponiendo que la fricción es despreciable.

Los experimentos para medir la velocidad máxima de un objeto que cae verticalmente desde una altura conocida demuestran que, en la práctica, la ganancia de energía cinética es menor que la pérdida de energía potencial gravitatoria. Esta diferencia puede proporcionar alguna información sobre las fuerzas de resistencia del aire que actúan sobre el objeto que cae. En la Figura 2.112 se representa un experimento relacionado con lo que acabamos de decir y en el que una masa que cae, m, tira de otra masa, M, por una mesa horizontal. En este caso es posible que la resistencia del aire sea insignificante, pero las fuerzas de fricción probablemente no lo son. Ambas masas ganan energía cinética.



■ **Figura 2.112**
Transferencia de energía potencial gravitatoria en energía cinética

Ejemplos resueltos

22 Se deja caer una pelota desde una altura de 18,3 m. ¿Con qué velocidad impactará contra el suelo? ¿Qué supuestos has considerado para efectuar este cálculo?

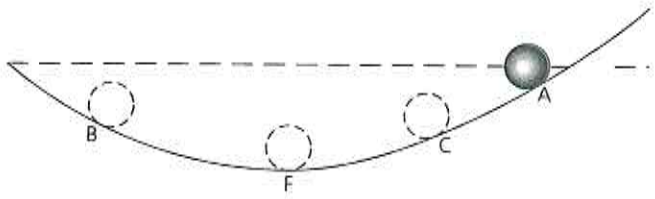
$v^2_{max} = 2g\Delta h$

$v^2_{max} = 2 \times 9{,}81 \times 18{,}3$

$v_{max} = 18{,}9\,m\,s^{-1}$

Hemos supuesto que no hay energía disipada a causa de la resistencia del aire. Fíjate en que esta pregunta se podría haber formulado de una manera distinta: ¿con qué velocidad se tendría que lanzar una pelota verticalmente hacia arriba para que alcance una altura de 18,3 m?

23 La pelota que se muestra en la Figura 2.113 se ha dejado caer desde un estado de reposo en la posición A. La pelota se acelera bajando por la pendiente y alcanza su velocidad máxima en el punto más bajo, F. A continuación sube por la otra cara de la pendiente y alcanza su altura máxima en el punto B.



■ **Figura 2.113**

a Explica por qué el punto B está más abajo que el punto A.

b Describe el movimiento de la pelota tras abandonar la posición B y explica las transferencias de energía que tienen lugar hasta que finalmente se queda en reposo en el punto F.

a Cuando la pelota rueda hacia delante y hacia atrás se produce una transferencia continua de energía potencial gravitatoria en energía cinética. La pelota solo podría alcanzar la misma altura A y volver a ganar toda la energía potencial gravitatoria si no hubiera fricción. Pero sí la hay y, por tanto, parte de la energía cinética de la pelota en movimiento es transferida en forma de energía interna de la pelota y de la pendiente. En consecuencia, la pelota no puede volver a alcanzar la misma altura A.

b La pelota se acelera a medida que baja por la pendiente. Cuando llega al punto F, toda la energía potencial gravitatoria adicional que tenía por su posición a una altura B ha sido transferida en forma de energía cinética, y la pelota alcanza su velocidad máxima en F. A medida que la pelota se desplaza hacia C su energía cinética vuelve a transformarse en energía potencial gravitatoria y la pelota se decelera. Además, siempre que la pelota se mueve, parte de la energía se transforma en energía interna, de modo que la altura máxima y la velocidad máxima de la pelota son cada vez menores. Al final, la pelota se acaba parando en el punto F.

2 Energía potencial elástica/energía cinética

En ocasiones podemos utilizar la energía almacenada en un muelle o en una cinta elástica para proporcionar energía cinética a un objeto y proyectarlo por el suelo o por el aire. En la Figura 2.114 se muestra un experimento en el que se utiliza una cuerda elástica para proyectar un carrito a través de una superficie horizontal. Cuando se deja de aplicar la fuerza, el carrito se mueve hacia la derecha a medida que la cuerda elástica recupera su forma. Se puede estudiar el efecto de la variación de la fuerza, la elongación de la cuerda elástica y la masa del carrito sobre la velocidad inicial del carrito.

Figura 2.114 *Proyección de un carrito mediante el estiramiento de una cuerda elástica*

Cuando disparamos una flecha con un arco se produce el mismo tipo de transferencia de energía a partir de energía potencial elástica. Si suponemos que la fuerza de estiramiento es proporcional a la elongación que produce, este tipo de transferencia de energía se puede expresar de forma cuantitativa de la manera siguiente:

$$E_p = E_c$$

$$\frac{1}{2}k\Delta x^2 = \frac{1}{2}mv^2$$

Sin embargo, debemos tener en cuenta que gran parte de la energía original se puede transformar en otras formas de energía, no solo en energía cinética del objeto proyectado. Consideremos el ejemplo siguiente:

Ejemplo resuelto

24 **a** Supongamos que la constante de fuerza de una catapulta es 480 N m^{-1}. Calcula la máxima velocidad posible que alcanzará una piedra de 50 g lanzada desde una catapulta si la elongación de la goma de la catapulta es 18 cm.
b Explica por qué en la práctica la velocidad será mucho menor.

a $\frac{1}{2}k\Delta x^2 = \frac{1}{2}mv^2$

$0{,}5 \times 480 \times 0{,}18^2 = 0{,}5 \times 0{,}05 \times v^2$

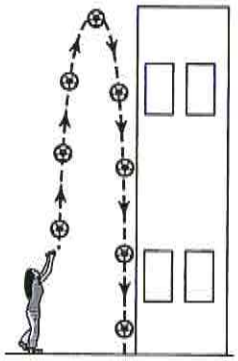
$v = 17{,}6\,m\,s^{-1}$

b Cuando aplicamos esta ecuación estamos suponiendo que la totalidad de la energía potencial elástica de la goma se transforma en energía cinética de la piedra, pero en la práctica mucha de la energía almacenada se transformará en energía cinética de la goma y en calentamiento de la goma.

117 ¿Desde qué altura tendríamos que dejar caer una masa para que impactara contra el suelo con una velocidad de 5 m s^{-1} exactamente? (Supón que no hay resistencia del aire).

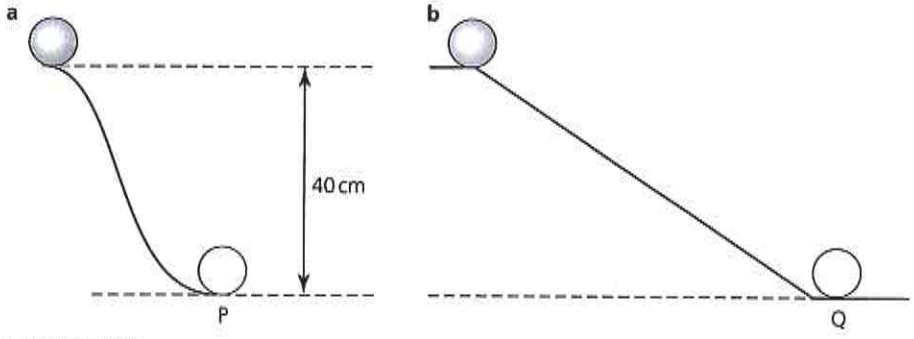
118 Se lanza una piedra verticalmente hacia arriba con una velocidad de 14 m s^{-1}. ¿Cuál es la altura máxima que alcanzará?

119 Para estimar la altura de un edificio se lanza repetidamente una pelota verticalmente hacia arriba a distintas velocidades hasta que alcanza justamente la parte superior del edificio (véase Figura 2.115).
a Estima la altura del edificio si pasan 4,2 s desde que se lanza la pelota hasta que golpea el suelo.
b ¿Cuáles son las principales fuentes de error en este experimento?



■ **Figura 2.115**

120 Se deja caer una pelota por una pendiente como la que se representa en la Figura 2.116a.
a Si suponemos que la superficie no presenta fricción, ¿cuál será la velocidad en el punto P? (Ignora los efectos de rodadura y de rotación de la pelota)
b Se deja caer la misma pelota por una pendiente (sin fricción) como la que se representa en la Figura 2.116b. ¿Cuál es la velocidad en el punto Q?
c Explica por qué la pelota alcanza más rápidamente el punto P que el punto Q.
d Pero las pelotas sí ruedan al bajar por las pendientes. Sugiere cómo afecta este hecho a tus respuestas.



■ **Figura 2.116**

121 Se deja caer una pelota de goma verticalmente sobre el suelo desde una altura de 1,0 m. Después de colisionar contra el suelo, la pelota rebota hasta una altura de 60 cm. Al siguiente rebote ya solo alcanza una altura de 36 cm.
   a ¿En qué forma se encuentra la energía cuando la pelota está en contacto con el suelo?
   b Enumera las transferencias de energía que tienen lugar desde que se deja caer la pelota hasta el máximo del primer rebote.
   c Calcula la velocidad de la pelota justo antes y justo después de que toque el suelo durante el primer rebote.
   d Predice cuál será la altura del tercer rebote. ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?

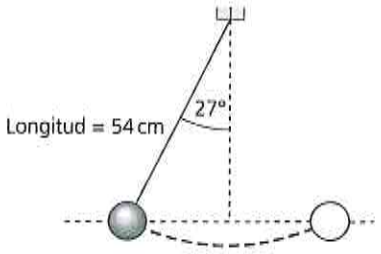


Figura 2.117

122 Calcula la máxima velocidad que alcanza el péndulo de la Figura 2.117 cuando se suelta desde la posición indicada.

123 Una bola de acero de masa 124 g que se desplaza a 8,24 m s^{-1} por una superficie horizontal sin fricción, colisiona con un muelle de compresión (con extremos abiertos) que tiene una constante de fuerza de 624 N m^{-1}. ¿Cuál es la máxima compresión posible del muelle?

124 Estiramos una cinta de goma de masa 4,7 g hasta obtener una elongación de 12 cm y después la soltamos, con lo que se proyecta verticalmente. La fuerza y la elongación son proporcionales y la constante de fuerza de la cinta es 220 N m^{-1}. Se supone que solo el 10% de la energía potencial elástica se transforma en energía cinética. Calcula la altura que alcanzará la cinta.

125 Un gimnasta de masa 39 kg salta desde una altura de 2,3 m sobre la superficie horizontal de un trampolín. Estima la constante de fuerza combinada de los muelles del trampolín si este se comprime 43 cm antes de pararse momentáneamente.

3 Realizar un trabajo para cambiar el movimiento

El uso de fuerzas para acelerar o decelerar objetos es una actividad humana habitual. La relación entre el trabajo realizado y el cambio de energía cinética tiene muchas aplicaciones. La ecuación es:

$$Fe = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mu^2$$

Para utilizar esta ecuación debemos asumir que la fuerza, F, es constante o bien podemos utilizar una fuerza media. Cuando la fuerza no varía linealmente se puede emplear el área bajo la curva fuerza–distancia para determinar el cambio en la energía cinética.

Esta ecuación se puede utilizar para objetos que se están acelerando o decelerando, pero cuando el movimiento empieza o acaba con un objeto en reposo (energía cinética cero) podemos escribir:

$$Fe = \frac{1}{2}mv^2$$

Esta ecuación nos indica que cuando se utiliza una fuerza para parar un objeto en movimiento, cuanto menor es la fuerza utilizada, mayor es la distancia que recorre el objeto hasta pararse. (O bien cuanto mayor es la fuerza utilizada, menor es la distancia que recorre el objeto hasta pararse). En consecuencia, para reducir las fuerzas en un impacto, la distancia (y el tiempo) que recorre el objeto hasta pararse debe ser lo mayor posible. Por ejemplo, saltar sobre arena comporta menos fuerza sobre nuestro cuerpo que saltar sobre un suelo sólido.

Si la velocidad de un objeto disminuye por el trabajo realizado por las fuerzas de fricción y/o la resistencia del aire, su energía cinética se transfiere en forma de energía interna, energía térmica o incluso algún tipo de sonido. Decimos entonces que la energía se ha **disipado**, es decir, se ha desprendido hacia el entorno. Este proceso sucede a nuestro alrededor constantemente.

Los objetos en movimiento también pueden ralentizarse porque colisionan con otros objetos. Como ocurre en el caso de la fricción, estas colisiones producen disipación de energía, pero normalmente parte de la energía se utiliza también para *deformar* los objetos. El cambio de forma puede ser temporal, pero a menudo es permanente.

Ejemplos resueltos

25 Una fuerza resultante constante de 2420 N actúa sobre un coche de 980 kg que está en reposo. ¿Cuál es la velocidad del coche cuando ha recorrido 100 m? (Ignora las fuerzas de resistencia.)

$$Fe = \frac{1}{2}mv^2$$
$$2420 \times 100 = \frac{1}{2} \times 980 \times v^2$$
$$v = 22\ \text{m s}^{-1}$$

(Si utilizamos $F = ma$ y las ecuaciones del movimiento obtenemos la misma respuesta.)

26 ¿Cuál es la fuerza media necesaria para parar un coche de masa 1350 kg y velocidad 28 m s^{-1} en una distancia de 65 m?

$Fe = \frac{1}{2}mv^2$

$F \times 65 = \frac{1}{2} \times 1350 \times 28^2$

$F = 8100\,N$

27 En un accidente de coche se debe impedir que el conductor se desplace hacia delante (respecto al coche) e impacte contra el volante en una distancia menor de 25 cm.

a Si el conductor tiene una masa de 80 kg, ¿qué fuerza se necesita para pararle dentro de esta distancia si el coche y él viajan a 10 m s^{-1} inmediatamente antes del impacto?

b ¿De dónde proviene la fuerza que se le aplica al conductor?

a $Fe = \frac{1}{2}mv^2$

$F \times 0{,}25 = \frac{1}{2} \times 80 \times 10^2$

$F = 16000\,N$

b La fuerza aplicada sobre el conductor proviene de una bolsa de aire que se hincha (airbag) y/o un cinturón de seguridad (Figura 2.118). Es una fuerza muy grande, pero considerablemente menor que la que actuaría sobre el conductor si colisionara con el volante. El efecto de la fuerza también se reduce porque se reparte en un área muy grande. (Esto último reduce la presión sobre el conductor.)

■ **Figura 2.118** *Un airbag reduce enormemente el impacto contra el volante en un accidente de coche*

126 ¿Qué fuerza media se necesita para reducir la velocidad de un tren de 400 000 kg desde 40 m s^{-1} hasta 10 m s^{-1} en una distancia de 1,0 km?

127 La «zona de deformación absorbente» es un elemento de diseño que incorporan la mayoría de vehículos (Figura 2.119). Esta zona está diseñada para comprimirse y deformarse de forma permanente si se produce una colisión. Utiliza la ecuación $Fe = \frac{1}{2}mv^2$ para explicar por qué un vehículo no debe ser tan duro y rígido.

■ **Figura 2.119**
El frontal del coche se deforma pero el compartimento del pasajero permanece intacto

128 Un saltador de *puenting* (Figura 2.120) de masa 61 kg se mueve a 23 m s^{-1} cuando la cuerda elástica comienza a estirarse.

a Calcula la energía cinética que lleva la cuerda en ese momento.

En la Figura 2.121 se representa la variación de la elongación de la cuerda respecto a la fuerza aplicada.

b ¿Qué cantidad representa el área bajo la curva?

c Describe la relación fuerza–elongación representada en la gráfica.

d Utiliza la gráfica para estimar cuál es la elongación de la cuerda elástica cuando el saltador se detiene finalmente en su caída.

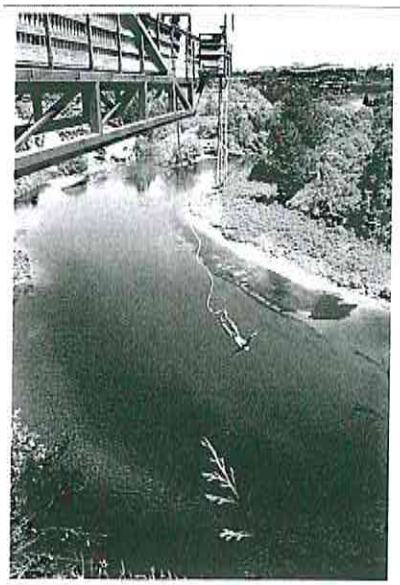


Figura 2.120
Puenting *en Taupo, Nueva Zelanda*

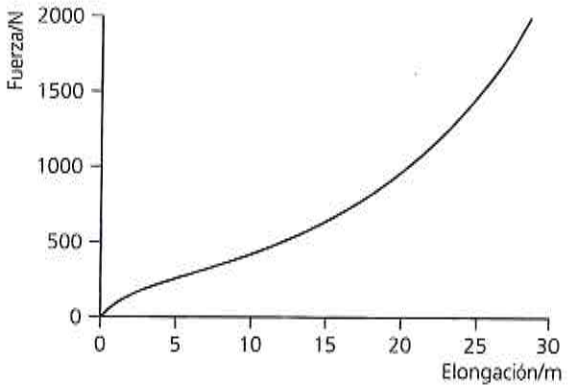


Figura 2.121 *Curva fuerza–elongación para una cuerda elástica de* puenting

129 Un saltador de pértiga de masa 59,7 kg cae desde una altura de 4,76 m sobre una colchoneta de espuma.
a Calcula la energía cinética máxima del impacto.
b ¿Tendrá la resistencia del aire un efecto significativo en la reducción de la velocidad del impacto? Razona tu respuesta.
c Si la colchoneta de espuma se deforma 81 cm, calcula la fuerza media ejercida por el saltador de pértiga.

130 Explica por qué siempre se deben doblar las rodillas cuando se salta sobre el suelo.

131 a Golpeamos una vez un clavo sobre un bloque de madera con un martillo de 1,24 kg que se mueve a 12,7 $m s^{-1}$. Si el clavo se introduce 15 mm en el bloque, ¿cuál es la fuerza media ejercida sobre el clavo?
b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?

Aplicaciones

Sistema de frenado regenerativo para trenes

La energía cinética que se debe proporcionar a un tren largo que se mueve a alta velocidad es considerable. Se pueden llegar a necesitar 10^8 J o más. Cuando el tren se detiene toda esta energía cinética se debe transferir a otras formas de energía y, a menos que se pueda recuperar, hay que transferir de nuevo la misma cantidad de energía para volver a acelerar el tren. Se trata de un proceso antieconómico en el que se despilfarra energía, por tanto se debe diseñar tanto el tren como su funcionamiento de manera que el despilfarro sea mínimo. Un posible método es minimizar el número de estaciones en las que paran los trenes grandes y rápidos, reduciéndolas al origen y al destino.

La mayoría de los sistemas de parada de vehículos en movimiento incluyen sistemas de frenado mediante los que la energía cinética del vehículo se transforma en energía interna a causa de la fricción. La energía interna se disipa al entorno en forma de

Figura 2.122
Los trenes ligeros de la red de transporte de Singapur (SBS) utilizan sistema de frenado regenerativo

energía térmica y no se puede recuperar. En los últimos años se han realizado numerosos estudios para diseñar «sistemas de frenado regenerativo» eficientes que normalmente comportan la generación de una corriente eléctrica que se puede utilizar para transferir energía en forma de transformaciones químicas que tienen lugar en baterías.

En las grandes ciudades de todo el mundo se utilizan pequeños trenes eléctricos que se desplazan por el subsuelo o por vías elevadas (Figura 2.122). Estos trenes suelen tener paradas cada pocos kilómetros o menos, y por tanto, la utilización de sistemas de frenado regenerativo o de otros sistemas de ahorro de energía es fundamental. En el diseño de nuevos trenes urbanos se ha sugerido que se podría ahorrar energía mediante el uso de una vía como la de la Figura 2.123.

■ **Figura 2.123** *Posible perfil de vía*

1 Explica qué quiere decir exactamente «ahorrar energía».

2 Explica el razonamiento que hay detrás de la propuesta que se representa en la Figura 2.123.

3 Propón otras posibles características de un sistema de tren urbano que podrían «ahorrar energía».

4 Analiza cuál sería el mejor tipo de motor/locomotora para este tipo de trenes.

Enlace con la teoría del conocimiento

Conceptos fundamentales

¿Hasta qué punto el conocimiento científico se basa en conceptos fundamentales como el de la energía? ¿Qué le sucede al conocimiento científico cuando nuestra comprensión de estos conceptos fundamentales cambia o evoluciona?

Cualquier definición en el ámbito de la física hace referencia casi con total seguridad a la energía, la masa y la fuerza. Estos conceptos se consideran esenciales para la comprensión del comportamiento del universo. También se pueden describir como fundamentales porque los científicos creen en la actualidad que estos conceptos no tienen una explicación simple, de modo que la comprensión de la física comienza con ellos. Pero nuestra comprensión de estos conceptos fundamentales ha cambiado a lo largo de los siglos y puede continuar evolucionando en el futuro.

La potencia como tasa de transferencia de energía

Cuando una persona, un animal o una máquina transfieren energía para realizar un trabajo útil, normalmente nos preocupa cuánto tiempo durará la transferencia. Si dos personas (o máquinas) efectúan la misma cantidad de trabajo útil decimos que la persona (o máquina) que lo hace más rápido es más potente. (En el uso diario, la palabra «potencia» se utiliza con un significado más vago, normalmente asociado a la fuerza y sin conexión con el tiempo). Si dos personas (o máquinas) efectúan la misma cantidad de trabajo útil decimos que la persona (o máquina) que lo hace utilizando la menor cantidad de energía es más eficiente.

La **potencia** es la tasa de transferencia de energía. Se define:

$$\text{potencia} = \frac{\text{energía transferida}}{\text{tiempo que dura la transferencia}}$$

El símbolo para la potencia es P y su unidad en el SI es el vatio, W ($1\ W = 1\ J\ s^{-1}$). Las unidades mW, kW, MW y GW son también de uso frecuente. A continuación se dan algunos ejemplos de valores de la potencia en la vida diaria.

- Cuando una mujer sube por unas escaleras transfiere energía química a energía gravitatoria a una tasa de unos 300W.
- Una bombilla de 18W transfiere energía eléctrica a energía luminosa y térmica a una tasa de 18 julios cada segundo.
- Una calculadora de 0,0001W transfiere energía a una tasa de 0,0001 julios cada segundo.

- Un calentador de agua de 2 kW transfiere energía eléctrica a energía interna a una tasa de 2000 julios cada segundo.
- Un coche familiar medio puede tener una potencia de salida máxima de 100 kW.
- Una central térmica de fuel transfiere energía química a energía eléctrica a una tasa de 500000000 de julios cada segundo.
- En los hogares de muchas ciudades se utiliza energía eléctrica a una tasa media de alrededor de 1 kW.

En este capítulo nos interesa la transferencia de energía que da lugar a un trabajo realizado, W, de modo que podemos escribir:

$$\text{potencia} = \frac{\text{trabajo realizado}}{\text{tiempo que se tarda en realizarlo}}$$

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

Esta ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplos resueltos

28 Calcula la potencia media de un escalador de 75 kg que escala una altura de 30 m en 2 minutos.

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

$$P = \frac{mg\Delta h}{\Delta t}$$

$$P = \frac{75 \times 9{,}81 \times 30}{2 \times 60}$$

$$P = 180\,\text{W}$$

29 ¿Qué potencia media se necesita para acelerar un coche de 1200 kg desde el estado de reposo hasta 20 ms^{-1} en 8,0 s?

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

P = energía cinética ganada/tiempo que se tarda en ganarla

$$P = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\Delta t}$$

$$P = \frac{0{,}5 \times 1200 \times 20^2}{8{,}0}$$

$$P = 3 \times 10^4\,\text{W} \; (= 30\,\text{kW})$$

Potencia transferida cuando se viaja a velocidad constante

En los cálculos del Ejemplo resuelto 29 no se tiene en cuenta la gran cantidad de trabajo realizado para vencer la resistencia del aire. Sin embargo, cuando un vehículo viaja a velocidad constante, todo el trabajo realizado se invierte en vencer la resistencia y no en producir aceleración. Si sustituimos por Fe en la ecuación de la potencia (donde F es la fuerza resistiva que, a velocidad constante, es igual y de sentido opuesto a la fuerza hacia delante), obtenemos:

$$P = \frac{F\Delta e}{\Delta t}$$

y como $\frac{\Delta e}{\Delta t} = v$, en consecuencia:

la potencia para mantener la velocidad constante = fuerza resistiva x velocidad

$$P = Fv$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

30 Un motor fueraborda con una potencia de salida máxima de 40 kW acciona un pequeño bote. La velocidad máxima que alcanza el bote es 27 nudos (1 nudo = 1,85 km h^{-1}). ¿Cuál es el módulo de la fuerza hacia adelante que proporciona el motor a esta velocidad?

$$1{,}85\,\text{km}\,\text{h}^{-1} = \frac{1{,}85 \times 1000}{3600} = 0{,}51\,\text{m}\,\text{s}^{-1}$$

A la velocidad máxima, la fuerza resistiva F = fuerza máxima del motor.

$P = Fv$

$40000 = F \times (27 \times 0{,}51)$

$F = 2900\,\text{N}$

Eficiencia

En física siempre nos topamos con el hecho de que, hagamos lo que hagamos, parte de la energía transferida «se pierde» porque se transfiere a formas menos «útiles». En mecánica este fenómeno normalmente se produce porque la fricción o la resistencia del aire transfieren energía cinética a energía interna y energía térmica. La energía útil que obtenemos a partir de cualquier transferencia de energía es *siempre* menor que la energía *total* transferida.

Cuando utilizamos un calentador de agua eléctrico, casi toda la energía transferida se emplea en calentar el agua y, por tanto, se puede describir como «útil», pero cuando utilizamos un cargador de teléfono móvil, por ejemplo, únicamente una parte de la energía se transfiere a la batería (la mayor parte de la energía restante se transfiere a energía térmica). Conducir un coche implica una transferencia de energía química desde el combustible, y la energía útil en este caso es la energía cinética del vehículo, aunque al final del trayecto no queda ya energía cinética.

Un proceso que proporciona una mayor salida de energía útil (para una entrada de energía dada) que otro proceso, se dice que es un proceso *más eficiente* que el segundo. La **eficiencia** se define de la manera siguiente:

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{energía útil de salida}}{\text{energía total de entrada}} = \frac{\text{trabajo útil de salida}}{\text{trabajo total de entrada}}$$

La eficiencia no tiene unidades porque es el cociente entre dos energías. Se suele expresar en forma de porcentaje. Como consecuencia del principio de conservación de la energía, la eficiencia siempre debe ser menor que 1 (o 100%).

Si dividimos el trabajo por el tiempo podemos obtener una definición alternativa de la eficiencia en la que figura la potencia:

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{potencia útil de salida}}{\text{potencia total de entrada}}$$

Estas dos ecuaciones figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Se puede estudiar la eficiencia de *cualquier* transferencia de energía, como por ejemplo la eficiencia con la que nuestro cuerpo transfiere la energía química de los alimentos a otras formas de energía. No obstante, cuando hablamos de eficiencia solemos referirnos a aparatos eléctricos y motores de diversos tipos, especialmente aquellos para los que se puede calcular fácilmente la energía o la potencia de entrada. En ocasiones debemos dejar muy claro de qué estamos hablando. Por ejemplo, cuando estudiamos la eficiencia de un coche, ¿nos referimos solo al motor, o al coche en su conjunto desplazándose por una vía con toda la energía de disipación debida a las fuerzas resistivas?

Las eficiencias de las máquinas y de los motores normalmente cambian con las condiciones de funcionamiento. Por ejemplo, existe una cierta carga con la que un motor eléctrico funciona con su máxima eficiencia; si se utiliza para levantar una masa muy pequeña o muy grande probablemente será ineficiente. De forma análoga, los coches están diseñados para tener su eficiencia máxima a una determinada velocidad, normalmente alrededor de los 100 km h^{-1}. Si el coche viaja a mayor (o menor) velocidad su eficiencia disminuye, lo que se traduce en que consume más combustible por cada quilómetro recorrido.

Los motores de los coches, como todos los demás motores que se basan en la quema de un combustible para transferir energía, son ineficientes a causa de principios físicos fundamentales (Opción B). No podemos hacer nada para cambiar este hecho, aunque las mejoras en el diseño y en el mantenimiento pueden suponer a su vez una mejora en la eficiencia.

Desde hace unos años existe una mayor conciencia mundial de la necesidad de conservar los recursos energéticos del planeta y limitar los efectos sobre el calentamiento global del uso de los combustibles de origen fósil en las centrales eléctricas y en diversos métodos de transporte (véase Capítulo 8). La mejora de la eficiencia de estos «motores térmicos» desempeña un importante papel en este tema de interés mundial.

Se pueden diseñar muchos tipos de experimentos para determinar la eficiencia de distintas máquinas y procesos. En la Figura 2.124 se muestra cómo se puede determinar la eficiencia de un motor eléctrico comparando la potencia eléctrica de entrada con la tasa a la que el motor puede levantar una *carga* (peso) conocido. Se puede estudiar la variación de la eficiencia con la carga y/o la potencia de entrada.

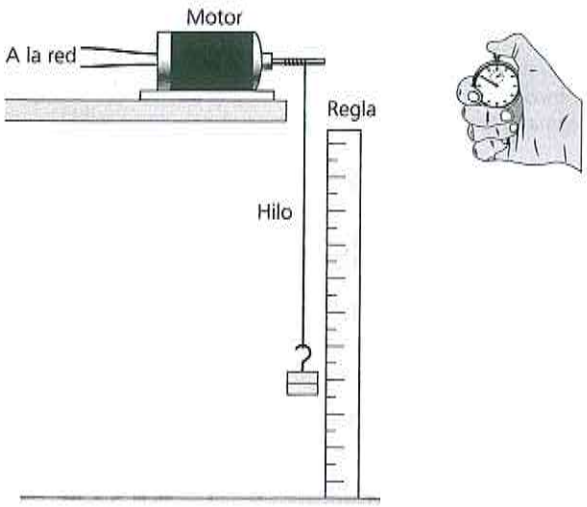


Figura 2.124 *Experimento para medir la eficiencia de un motor*

Ejemplo resuelto

31 a En un experimento se proporciona energía eléctrica a un motor a una tasa de 0,80 W (Figura 2.124). ¿Cuál es la eficiencia del motor si levanta una carga de 20 g a una altura de 80 cm en 1,3 s?

b ¿Qué le sucede a la energía que no es transferida de forma útil a la carga?

a Potencia utilizada para levantar la masa, $P = \frac{mg\Delta h}{\Delta t}$

$$P = \frac{0{,}02 \times 9{,}81 \times 0{,}80}{1{,}3}$$

$$P = 0{,}12\,\text{W}$$

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{potencia útil de salida}}{\text{potencia total de entrada}}$$

$$\text{eficiencia} = \frac{0{,}12}{0{,}80} = 0{,}15 \text{ (o } 15\%\text{)}$$

b El 85% de la energía transferida por la red eléctrica al motor no se aplica con éxito a aumentar la energía gravitatoria de la carga. La energía «perdida» se transforma principalmente en energía interna del motor, que después se transforma en energía térmica que va a parar al entorno. Además, una parte de la energía se transforma en sonido y otra se utiliza en estirar el muelle que conecta la carga con el motor.

132 a ¿Cuánta energía se debe transferir a doce botellas de 1,7 kg para levantarlas desde el suelo hasta una estantería que está a 1,2 m de altura?

b Si para hacer esta operación se han tardado 18 s, ¿cuál ha sido la potencia media útil?

133 Estima la potencia de salida de un motor que puede elevar un ascensor de 800 kg de masa con seis pasajeros un total de 38 pisos en 52 s. (Supón que no hay contrapeso).

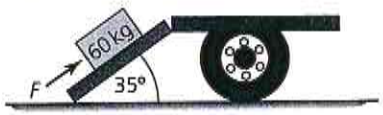
134 ¿Qué magnitud tienen las fuerzas resistivas que se oponen al movimiento de un coche que funciona con una potencia de salida de 23 kW a una velocidad constante de 17 m s^{-1}?

135 a ¿Cuál es la potencia de salida de un avión a reacción que tiene un empuje hacia delante de 660 000 N cuando viaja a su velocidad máxima de 950 km h^{-1} (264 m s^{-1}) a través del aire en calma?

b Si en un hogar se consume en promedio una potencia eléctrica de 1 kW, ¿a cuántos hogares se podría suministrar potencia con la cantidad calculada en el apartado anterior?
c Discute si el rápido aumento del uso del avión para viajar alrededor del mundo es recomendable o no.

136 La potencia de salida de una central eléctrica es 325 MW. ¿Cuál es la potencia de entrada si la eficiencia es del 36%?

137 Una persona utiliza una rampa para empujar una caja de 60,0 kg hacia la parte trasera de un camión, tal como se muestra en la Figura 2.125. Para levantar la caja directamente se necesitaría una fuerza vertical de 590 N, pero si se utiliza la rampa la fuerza necesaria se reduce.



■ **Figura 2.125**

a Calcula la fuerza mínima necesaria para subir la caja a la rampa si no hay fricción.
b En la práctica la fuerza necesaria es 392 N. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza de fricción? Explica por qué puede ser útil la fuerza de fricción.
c La longitud de la rampa es 2,11 m. Calcula el trabajo realizado al subir la caja por la rampa desde el suelo hasta el camión.
d La energía útil transferida a la caja es su energía potencial gravitatoria. Calcula la eficiencia cuando se utiliza la rampa.

2.4 Momento e impulso

La conservación del momento es un ejemplo de ley inviolable

■ Momento

El producto de la masa por la velocidad es una importante cantidad física.

El **momento lineal** se define como la masa multiplicada por la velocidad.

El momento se representa mediante el símbolo p y sus unidades son los quilogramos por metro y por segundo, kg m s^{-1}.

$$p = mv$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Como la ecuación de la energía cinética es $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, la conexión entre el momento y la energía cinética se puede expresar como:

$$E_c = \frac{p^2}{2m}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Cuando se efectúan cálculos en los que aparece el momento lineal, es importante recordar que se trata de una magnitud vectorial y que, por tanto, siempre se debe dar su dirección y su sentido. En el núcleo de este curso solo trabajaremos con el momento asociado al movimiento en línea recta (momento *lineal*), pero podemos aplicar las mismas ideas al momento *angular* asociado a los objetos o las partículas en rotación (Opción B).

Ejemplo resuelto

32 Una pelota de masa 540 g que se mueve verticalmente hacia abajo impacta contra el suelo a una velocidad de 8,0 m s^{-1}. Después del impacto rebota hacia arriba con una velocidad inicial de 5,0 m s^{-1}.
a Calcula el momento de la pelota inmediatamente antes del impacto e inmediatamente después de este.
b ¿Cuál es el cambio en el momento durante el impacto (Δp)?

a El momento inicial antes del impacto, $p = mu = 0{,}54 \times 8{,}0 = 4{,}3$ kg m s^{-1} hacia abajo. El momento final tras el impacto, $p = mv = 0{,}54 \times 5{,}0 = 2{,}7$ kg m s^{-1} hacia arriba.

Los sentidos opuestos se pueden representar mediante signos positivos y negativos en lugar de descripciones. Así, el momento antes del impacto es +4,3 kg m s^{-1} y el momento tras el impacto es −2,7 kg m s^{-1}. (La elección de signos es intercambiable.)

b $\Delta p = (-2{,}7) - (+4{,}3) = -7{,}0$ kg m s^{-1} (hacia arriba)

Expresión de la segunda ley de Newton en términos de tasa de cambio del momento

Si volvemos a la segunda ley del movimiento de Newton ($F = ma$), podemos reescribirla en términos del momento mediante la definición de la aceleración, $a = (v - u)/t$:

$$F = \frac{m(v - u)}{t}$$

$$F = \frac{mv - mu}{t}$$

Esta ecuación se puede expresar con palabras de la manera siguiente: la fuerza es igual al cambio en el momento dividido por el tiempo, o la *fuerza es igual a la tasa de cambio del momento*. Esta versión de la segunda ley de Newton se escribe habitualmente en la forma:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

En la mayoría de situaciones ambas versiones de la segunda ley de Newton son equivalentes y elegiremos una u otra en función de la información disponible. Como la versión anterior no requiere conocer el dato de una masa constante, se trata de una formulación de la segunda ley más generalizada.

En la Figura 2.126 se muestra un golpe de kárate con el que se rompen varias tablas de madera. Consideremos $F = \Delta p/\Delta t$: para maximizar la fuerza que actúa entre la mano y las tablas, la masa que impacta contra las tablas debe ser lo mayor posible y debe moverse a gran velocidad. El tiempo de impacto debe ser el menor posible.

Figura 2.126
Golpe de kárate sobre tablas de madera

Impulso y gráficas fuerza–tiempo

Impulso

Tal como se ha explicado al principio de este capítulo, muchas fuerzas actúan sobre los objetos solo durante un tiempo limitado, y cuanto más tiempo actúa la fuerza mayor es el efecto que produce. Por este motivo se introduce el concepto de *impulso*:

El **impulso** se define como el producto de la fuerza por el tiempo durante el que actúa:

impulso = $F\Delta t$

Si reorganizamos la ecuación $F = \Delta p/\Delta t$ obtenemos:

$$F\Delta t = \Delta p$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. Expresada con palabras dice:

impulso = cambio del momento

El impulso tiene las mismas unidades que el momento: $kg\,m\,s^{-1}$ (también se puede utilizar N s). En este libro no emplearemos ningún símbolo para representar el impulso.

Ejemplo resuelto

33 Calcula la fuerza media ejercida sobre la pelota que rebota contra el suelo del Ejemplo resuelto 32 si la duración del impacto es 0,18 s.

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$F = \frac{-7,0}{0,18} = -39\,\text{N}$$

(El signo negativo indica una fuerza hacia arriba).

Podríamos obtener la misma respuesta a partir de $F = ma$:

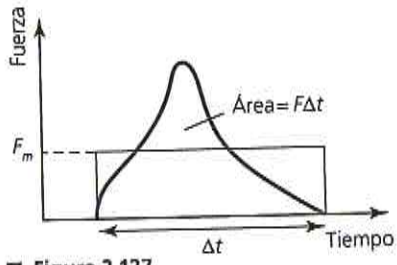
$$a = \frac{(v-u)}{t} = \frac{(-5,0)-(+8,0)}{0,18} = -72\,\text{m s}^{-2}$$

Entonces,

$$F = ma = 0,54 \times (-72) = -39\,\text{N}$$

Gráficas fuerza–tiempo

Cuando efectuamos cálculos simples relacionados con el impulso podemos suponer que las fuerzas implicadas son constantes, o bien que la fuerza media es la mitad de la fuerza máxima. Sin embargo, si queremos efectuar cálculos más exactos estas suposiciones no bastan, y necesitamos conocer con detalle la variación de la fuerza durante la interacción. Estos detalles se representan habitualmente mediante gráficas fuerza–tiempo. La curva de la Figura 2.127 representa un ejemplo típico de la variación de una fuerza a lo largo de un tiempo.



■ **Figura 2.127**
Gráfica en la que se representa la variación de la fuerza con el tiempo

En general, el área bajo la curva fuerza–tiempo de una interacción equivale a la fuerza x tiempo, que equivale a su vez al impulso (o cambio del momento). Esto es cierto con independencia de la forma de la curva. Se puede estimar el área bajo la curva de la Figura 2.127 dibujando un rectángulo de la misma área (a ojo), como el marcado en rojo. La fuerza media durante la interacción es, por tanto, el valor F_m.

Se pueden utilizar sensores de fuerzas para medir la magnitud de las fuerzas que actúan en intervalos cortos de tiempo, y registradores de datos que recojan los datos obtenidos con el fin de representar gráficas de fuerza–tiempo para numerosas interacciones, tanto dentro como fuera del laboratorio. También es muy interesante e instructivo visionar grabaciones con moviola de colisiones.

Las gráficas fuerza–tiempo pueden ser útiles para el análisis de cualquier tipo de interacción, pero lo son especialmente en el caso de impactos relacionados con accidentes de tráfico y deportes.

Ejemplo resuelto

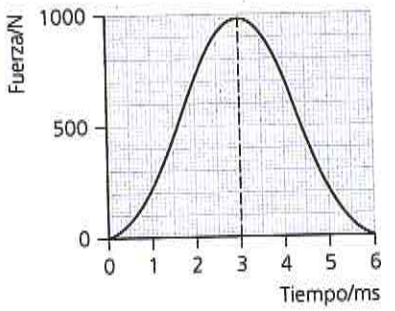
34 En la Figura 2.128 se representa la variación de la fuerza que actúa sobre una pelota de tenis de masa 57 g que se mueve a 24 m s^{-1} cuando es golpeada por una raqueta que se mueve en sentido contrario.

a Estima el impulso proporcionado a la pelota.

b ¿Cuál es la velocidad de la pelota tras haber sido golpeada por la raqueta?

c Golpeamos la pelota con la misma fuerza pero con distintas raquetas. Explica por qué una raqueta con las cuerdas flojas devuelve la pelota con una velocidad mayor.

d ¿Cuál es la desventaja de jugar al tenis con una raqueta con las cuerdas flojas?



■ **Figura 2.128**
Gráfica fuerza–tiempo cuando se golpea una pelota de tenis

a Área aproximada bajo la curva = $1\,000 \times (3,0 \times 10^{-3}) = 3,0\,\text{N s}$

b $m\Delta v = 3,0$

$$\Delta v = \frac{3,0}{0,057} = 53\,\text{m s}^{-1}$$

La velocidad inicial es $24\,m\,s^{-1}$ hacia la raqueta. Si el cambio de velocidad es de $53\,m\,s^{-1}$, la pelota debe haber salido despedida de la raqueta con una velocidad de $(53 - 24) = 29\,m\,s^{-1}$.

c El tiempo de contacto con la pelota, Δt, es mayor cuando las cuerdas de la raqueta están flojas, por tanto, la misma fuerza producirá un mayor impulso (cambio del momento).

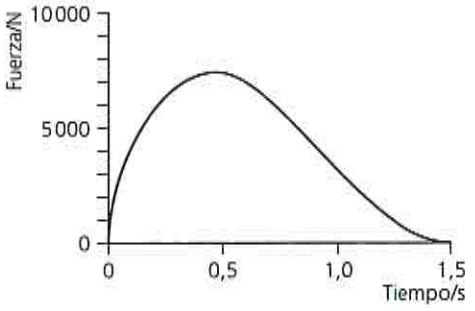
d Hay un menor control de la dirección de la pelota.

138 Un tren de masa $2,3 \times 10^6$ kg que viaja hacia el este por una vía recta a una velocidad de $14,3\,m\,s^{-1}$ reduce su velocidad hasta $9,8\,m\,s^{-1}$. ¿Cuál es el cambio en el momento?

139 ¿Qué fuerza media se necesita para reducir la velocidad de un coche de 1200 kg desde $24\,m\,s^{-1}$ a $11\,m\,s^{-1}$ en 4,8 s?

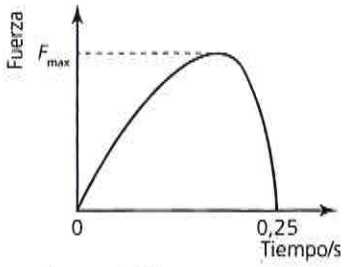
140 Un bate de béisbol golpea una pelota con una fuerza media de 970 N que actúa durante 0,0088 s.
- **a** ¿Qué impulso se le ha proporcionado a la pelota?
- **b** ¿Cuál es el cambio del momento de la pelota?
- **c** La pelota vuelve a ser golpeada en la misma dirección que venía. Si su velocidad antes del impacto es $32\,m\,s^{-1}$, ¿cuál es su velocidad después de este? (La masa de la pelota de béisbol es de 145 g).

141 En la Figura 2.129 se representa la variación con el tiempo de la fuerza entre dos coches que colisionan. Ambos coches viajan en la misma dirección y después de colisionar no quedan pegados.
- **a** Estima el impulso.
- **b** Justo antes de la colisión el coche que va más rápido (masa 1200 kg) viaja a $18\ m\ s^{-1}$. Estima su velocidad inmediatamente después de la colisión.



■ **Figura 2.129**

142 Una pelota blanda (A) de masa 500 g se mueve hacia la derecha con una velocidad de $3,0\,m\,s^{-1}$ cuando colisiona con otra pelota blanda (B) que se mueve hacia la izquierda. La duración del impacto es 0,34 s y tras este la pelota A rebota con una velocidad de $2,0\,m\,s^{-1}$.
- **a** ¿Cuál es el cambio de velocidad de la pelota A?
- **b** ¿Cuál es el cambio del momento de la pelota A?
- **c** Calcula la fuerza media ejercida sobre la pelota A.
- **d** Esboza una gráfica fuerza–tiempo para el impacto.
- **e** Añade a la gráfica anterior una posible curva fuerza–tiempo para la colisión de pelotas duras de masas y velocidades similares.
- **f** Sugiere motivos por los que la curva fuerza–tiempo para la pelota B podría ser distinta (o igual) que la curva fuerza–tiempo para la pelota A.



■ **Figura 2.130**

143 Un conductor que ha sufrido un accidente ha evitado impactar contra el volante gracias a la acción de un airbag. En la Figura 2.130 se representa la variación de la fuerza sobre el conductor durante el accidente (hasta que el coche se queda en reposo).
- **a** Si sobre el conductor ha actuado una fuerza máxima de 2800 N, estima la fuerza media que ha actuado durante los 0,25 s.
- **b** ¿Cuál ha sido el cambio del momento del conductor?
- **c** Si la masa del conductor es 73 kg, ¿cuál era la velocidad en $km\,h^{-1}$ del coche y el conductor antes del accidente?

144 Considera la Figura 2.126.
- **a** Analiza con detalle cómo puede el movimiento del karateka maximizar la fuerza ejercida sobre las tablas de madera.
- **b** Sugiere qué características de las tablas pueden contribuir a llevar a cabo esta impresionante demostración.

145 **a** ¿Cuál es el momento de un coche de 1340 kg que tiene una energía cinética de $4,30 \times 10^5$ J?
- **b** ¿Cuál es la energía cinética de una masa de 340 g que tiene un momento de $8,3\,kg\,m\,s^{-1}$?
- **c** ¿Cuál es la masa de una partícula subatómica que tiene un momento de $2,50 \times 10^{-23}\,kg\,m\,s^{-1}$ cuando su energía cinética es $3,43 \times 10^{-16}$ J?

Conservación del momento lineal

A partir de la tercera ley de Newton sabemos que cuando dos objetos *cualesquiera* interactúan (más comúnmente *colisionan*) durante un tiempo deben ejercerse mutuamente una fuerza, F, igual y de sentido opuesto. Consideremos de nuevo la Figura 2.89.

$$F_A = -F_B$$

Como consecuencia, los impulsos, F, y los cambios del momento, también deben ser iguales y de sentidos opuestos:

$$F_A \Delta t = -F_B \Delta t$$
$$\Delta p_A = -\Delta p_B$$

En otras palabras, si los objetos A y B se ejercen fuerzas mutuamente, cualquier ganancia de momento de A *debe* ser igual a la pérdida de momento de B de manera que el momento total permanezca constante. Hay que remarcar que esto es cierto *solo si no están actuando otras fuerzas externas*. La *ley de conservación del momento* expresa todo lo anterior:

El momento (lineal) total de cualquier sistema es constante siempre que no actúen fuerzas externas sobre él.

Aunque el principio de conservación del momento contiene en esencia la misma física que la ley de Newton, normalmente tiene una mayor aplicación en las situaciones cotidianas. El motivo es que se refiere a las masas y a las velocidades antes y después de una interacción, y no a las fuerzas que varían durante intervalos cortos de tiempo.

Naturaleza de la ciencia

Por qué es tan importante el concepto de momento

No se conocen excepciones al principio de conservación del momento (tercera ley de Newton), y esta es la razón por la que el momento es una magnitud física tan importante. Como le ocurre a la energía, el momento *siempre* se conserva. En consecuencia, estos principios fundamentales son piezas extremadamente útiles de la física que pueden contribuir a predecir lo que ocurrirá en cualquier interacción en la que intervengan fuerzas entre cualquier número de objetos, desde los más grandes (astronómicos) a los más pequeños (microscópicos), como por ejemplo las colisiones entre partículas atómicas.

Cuando utilizamos el principio de conservación del momento debemos recordar los puntos siguientes:

- El momento es una magnitud vectorial, de modo que en los cálculos siempre se debe incluir su dirección y sentido.
- El sistema debe estar aislado: solo se deben considerar los objetos que interactúan y no debe haber fuerzas que actúen desde el exterior.
- Inmediatamente después de una interacción, habitualmente las fuerzas externas (como la fricción) afectan al movimiento de los objetos.

Es fácil poner ejemplos en los que el momento de un objeto disminuye hasta cero, lo que parece contradecir el principio de conservación del momento. Esta pérdida aparente de momento normalmente se debe a que el sistema no está aislado (sobre él actúan fuerzas externas, como la fricción). En otros ejemplos, parece que se pierde parte del momento o la totalidad de este cuando algo colisiona con un objeto que tiene una masa mucho mayor. Puede suceder que el movimiento tras el impacto sea demasiado pequeño para que pueda ser observado o medido. Un ejemplo característico es el de una persona que salta sobre el suelo. El movimiento que se puede predecir del sistema persona–Tierra tras el impacto es insignificante.

La fuerza de la gravedad normalmente produce un incremento del momento de los objetos que caen, pero los objetos no son sistemas aislados, ya que hay fuerzas externas actuando sobre ellos. Por ejemplo, una piedra de 3 kg experimenta una fuerza gravitatoria hacia la Tierra de unos 30 N aproximadamente y, por tanto, gana momento a medida que se acelera hacia abajo. La ley de conservación del momento predice correctamente que la Tierra debe ganar un momento equivalente hacia arriba en dirección a la roca. Sin embargo, como la masa de la Tierra es tan grande, su ganancia de momento es insignificante.

En la Figura 2.131 podemos ver pistolas de agua. Antes del disparo, la pistola y el agua que hay en su interior no tienen momento, pero tras el disparo el agua gana momento (hacia delante). El principio de conservación del momento nos dice que la pistola debe ganar un momento igual al del agua pero en sentido contrario.

Figura 2.131
Las pistolas de agua son muy populares en el festival de Songkran (Tailandia)

Ejemplo resueltos

35 Una masa A (4,0 kg) se desplaza a 3,0 m s–1 hacia la derecha cuando colisiona con una masa B (6,0 kg) que se desplaza en sentido opuesto a 5,0 m s^{-1}.

a Si ambas masas se quedan pegadas tras la colisión, ¿cuál es su velocidad?

b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta para responder a la pregunta anterior?

a El momento total debe ser el mismo antes y después de la colisión. Si escogemos el signo positivo para las velocidades y los momentos que van hacia la derecha, y el signo negativo para las (y los) que van hacia la izquierda:

momento de A = $m_A u_A = 4{,}0 \times (+3{,}0) = +12{,}0\,\text{kg m s}^{-1}$

momento de B = $m_B u_B = 6{,}0 \times (-5{,}0) = -30\,\text{kg m s}^{-1}$

Por tanto, el momento total (antes de la colisión) es $+12 + (-30) = -18\,\text{kg m s}^{-1}$. El momento total después de la colisión debe ser el mismo que el momento antes de esta, en consecuencia:

$m_{AB} v_{AB} = -18\,\text{kg m s}^{-1}$

$(4 + 6) v_{AB} = -18\,\text{kg m s}^{-1}$

$v_{AB} = \frac{-18}{10} = -1{,}8\,\text{m s}^{-1}$

El signo negativo indica que la velocidad va hacia la izquierda.

El método que se ha seguido hasta aquí se ha explicado detalladamente para facilitar la comprensión. Sin embargo, para responder cualquier pregunta relacionada con la interacción de dos masas se puede proceder de una manera más directa:

momento antes de la interacción = momento después de la interacción

$m_A u_A + m_B u_B = m_A v_A + m_B v_B$

En este ejemplo:

$(4{,}0 \times 3{,}0) + (6{,}0 \times -5{,}0) = (4{,}0 + 6{,}0) \times v_{AB}$

$v_{AB} = -1{,}8\,\text{m s}^{-1}$

b La suposición que se ha tenido en cuenta es la no existencia de fuerzas externas actuando sobre el sistema. Si las fuerzas de fricción son significativas, la respuesta que hemos calculado se puede considerar que corresponde a la velocidad instantánea inmediatamente después de la colisión, y los efectos de la fricción se pueden tener en cuenta más tarde.

36 Un autobús de masa 5 800 kg que viaja a una velocidad constante de 24 m s^{-1} impacta con la parte trasera de un coche de masa 1 200 kg que viaja a 18 m s^{-1} en la misma dirección y sentido. Calcula la velocidad del autobús inmediatamente después de la colisión si el coche es empujado hacia delante con una velocidad de 20 m s^{-1}. (Supón que se trata de un sistema aislado e ignora las acciones de los conductores y de los motores.)

momento antes de la interacción = momento después de la interacción

$m_A u_A + m_B u_B = m_A v_A + m_B v_B$

$(5\,800 \times 24) + (1\,200 \times 18) = (5\,800 \times v_{bus}) + (1\,200 \times 20)$

$v_{bus} = 23{,}6\,\text{m s}^{-1}$ en la dirección y sentido originales

37 Se dispara una bala de masa 12,0 g a una velocidad de 550 m s^{-1} con un rifle de masa 1,40 kg (Figura 2.132). ¿Qué le sucede al rifle?

En este ejemplo el momento total es cero. Esto significa que el momento de la bala debe ser igual al del rifle y en sentido opuesto.

momento antes de la interacción = momento después de la interacción

$m_A u_A + m_B u_B = m_A v_A + m_B v_B$

$0 + 0 = (0{,}012 \times 550) + (1{,}40 \times v_{rifle})$

$v_{rifle} = \frac{-6{,}60}{1{,}40} = -4{,}71\ m\,s^{-1}$

El signo negativo indica que el rifle se mueve en sentido contrario a la bala. (A este fenómeno se le suele denominar *retroceso*).

■ **Figura 2.132**

Perspectivas adicionales

El principio de conservación del momento y los accidentes de tráfico

El principio de conservación del momento es útil cuando se quieren determinar las velocidades de vehículos involucrados en un accidente de tráfico.

■ **Figura 2.133**
En esta prueba de colisión se conserva el momento

Cada año mueren en el mundo más de 1,2 millones de personas a causa de accidentes de tráfico y cerca de 25 millones sufren lesiones graves por esta misma causa. En promedio, las posibilidades que tiene una persona de morir en un accidente de tráfico ascienden a 1 sobre 80. No obstante, existen grandes diferencias en los niveles de seguridad vial entre los distintos países, principalmente a causa de las diferencias en el comportamiento de los conductores y de otros usuarios de la vía, además de los propios niveles de control policial y el estado de conservación de las vías.

En la mayoría de países el diseño de nuevos vehículos contempla muchos elementos destinados a proteger a sus ocupantes en caso de accidente. Entre los denominados **elementos de seguridad pasiva** se cuentan los cinturones de seguridad, los *airbags*, el almohadillado de las superficies interiores y las zonas de deformación absorbente. Todos estos elementos reducen las fuerzas del impacto mediante el incremento del tiempo y la distancia asociados. Sin embargo, a la mayoría de las personas que mueren a causa de accidentes de tráfico no les afectan estas medidas porque no se encuentran *dentro* de los vehículos: normalmente son, o bien peatones, o bien conductores o pasajeros de bicicletas o motos de diversos tipos, que reciben el impacto de vehículos que se mueven más rápido.

1 Busca en Internet qué lugar ocupa tu país en la lista anual de accidentes de tráfico/muertes. Si es posible, determina las principales causas de accidentes de tráfico en tu país y discute cómo se podría mejorar esta situación.

2 Existe un acuerdo común sobre el hecho de que los vehículos que viajan demasiado rápido (para las condiciones de la vía) son una causa principal de accidentes graves. Recuerda que cuando se duplica la velocidad de un coche su energía cinética aumenta en un factor cuatro. La reducción de los límites de velocidad es una recomendación evidente para intentar reducir el número de accidentes, pero muchas personas están en contra de esta idea. Sugiere por qué.

146 Un cuerpo de masa 2,3 kg que se desplaza hacia la izquierda a 82 cm s^{-1} colisiona con una masa en reposo de 1,9 kg. Si tras la colisión el cuerpo y la masa quedan pegados, ¿cuál es la velocidad después del impacto?

147 Se deja caer al suelo desde una altura de 1,46 m un saco de cemento de 50,9 kg que está en reposo.
- **a** ¿Cuál es la velocidad máxima del saco cuando impacta contra el suelo?
- **b** ¿Habrá mucha diferencia entre la velocidad real y la velocidad teórica máxima? Razona tu respuesta.
- **c** Suponiendo que el saco no rebote, predice cuál será la velocidad combinada de la Tierra y el saco después del impacto. (Masa de la Tierra = $6,0 \times 10^{24}$ kg). ¿Se puede medir esta velocidad?

148 Para determinar la velocidad de una bala de 2,4 g, se idea un experimento que consiste en dispararla contra un bloque de madera de 650 g en reposo sobre una superficie sin fricción. Si el conjunto bloque + bala sale desplazado con una velocidad inicial de 96 cm s^{-1}, ¿cuál era la velocidad de la bala?

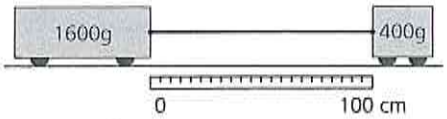
149 Una bala que se mueve verticalmente hacia arriba decelera y su momento decrece, aunque la ley de conservación del momento afirma que el momento total no puede cambiar. Explica esta observación.

150 Una astronauta de masa 90 kg lanza un martillo de 2,3 kg a una velocidad de 80 cm s^{-1}. ¿Qué le sucede a la astronauta? ¿Cómo puede dejar de moverse?

151 Dos coches de juguete viajan en la misma dirección y sentidos contrarios por una vía sin fricción. El coche A tiene una masa de 432 g y una velocidad de 83,2 cm s^{-1}. El coche B tiene una masa de 287 g y una velocidad de 68,2 cm s^{-1}. Si se quedan pegados tras el impacto, ¿cuál es su velocidad combinada?

152 Una bala de acero de masa 1,2 kg que se mueve a 2,7 m s^{-1} colisiona frontalmente contra otra bala de acero de masa 0,54 kg que se mueve en sentido contrario a 3,9 m s^{-1}. Las balas rebotan una contra la otra y cada una vuelve en la misma dirección que vino.
- **a** Si la velocidad de la bala más pequeña tras la colisión es 6,0 m s^{-1}, utiliza la ley de conservación del momento para predecir la velocidad de la bala más grande.
- **b** En realidad, este resultado es imposible. Sugiere un motivo para ello.

153 En la Figura 2.134 se muestran dos carritos que se desplazan por una superficie sin fricción y que se mantienen unidos mediante una cuerda elástica bajo tensión. Cuando se libera esta tensión, los carritos se aceleran uno hacia el otro y la cuerda se afloja rápidamente. ¿Cuándo crees que colisionarán los carritos?



■ **Figura 2.134**

■ Propulsión de vehículos

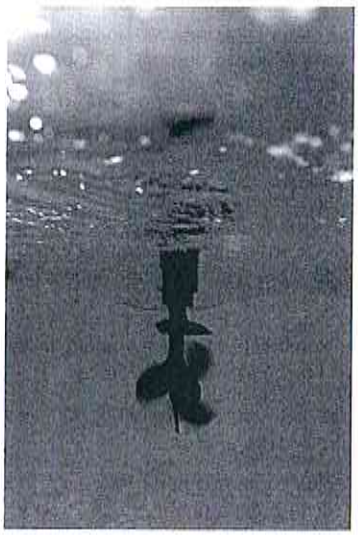
Para acelerar un vehículo, o para mantener su movimiento a velocidad constante superando las fuerzas de fricción y la resistencia del aire, necesitamos aplicar una fuerza. Podemos pensar en empujar el vehículo hacia atrás, de modo que la vía empuje el vehículo hacia delante (tercera ley de Newton). Sin embargo, la mejor manera de explicar el movimiento de barcos o vehículos a través del aire o del espacio, es mediante el momento proporcionado a algo que se mueva en sentido contrario al sentido del movimiento que nos interesa para el vehículo en cuestión.

Cuando la hélice de la Figura 2.135 gira, una fuerza empuja el agua hacia atrás y, por tanto, otra fuerza igual y en sentido contrario empuja la lancha hacia adelante. Si no hubiera otras fuerzas actuando sobre la lancha, el momento (hacia atrás) del agua que se desplaza a gran velocidad sería igual y en sentido contrario al momento (hacia delante) de la lancha que se desplaza lentamente.

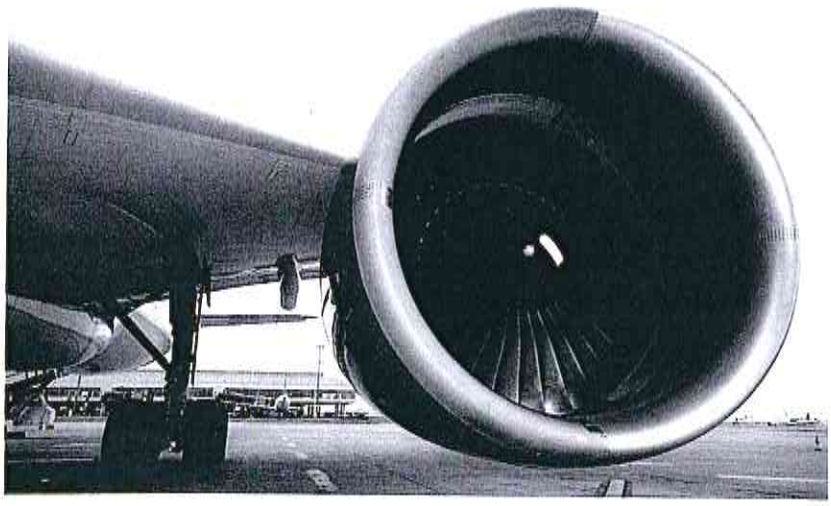
El uso de remos y palas en las barcas se basa en principios análogos, mientras que las hélices de aviones y helicópteros desplazan el aire a gran velocidad en sentido contrario al sentido del movimiento que nos interesa para el vehículo en cuestión.

Los motores a propulsión del avión de la Figura 2.136 queman combustible combinado con oxígeno del aire que entra por la parte delantera del motor. Los gases resultantes son eyectados (lanzados hacia fuera) a gran velocidad por la parte trasera del motor. La ganancia de momento (hacia atrás) de los gases debe ser igual y de sentido contrario a la ganancia de momento (hacia delante) del motor + el avión (si no actúan otras fuerzas).

La tercera ley de Newton ofrece una explicación alternativa equivalente: la fuerza que empuja los gases hacia atrás es igual y de sentido contrario a la fuerza que empuja el avión hacia delante. Para el caso de los cohetes se pueden aplicar ideas similares, salvo que no hay entrada de aire por la parte delantera.



■ **Figura 2.135**
La hélice situada en la parte trasera de la lancha ejerce una fuerza sobre el agua y el agua ejerce a su vez una fuerza en sentido contrario que desplaza la lancha



■ **Figura 2.136**
Motor a propulsión

154 Un motor de cohete de una nave espacial de masa total 10000 kg, eyecta 1,4 kg de gases a alta temperatura cada segundo a una velocidad discontinua de 240 $m s^{-1}$ (en promedio).
- **a** ¿Cuál es la fuerza ejercida sobre la nave espacial?
- **b** ¿Cuál es la aceleración de la nave espacial?
- **c** Si el motor de cohete funciona durante 30 s, ¿qué impulso proporciona a la nave espacial?
- **d** ¿Cuál es el cambio de velocidad?

■ **Figura 2.137**

155 **a** Utiliza la tercera ley de Newton para explicar cómo puede sustentarse en el aire el helicóptero de la Figura 2.137.
b Las palas de la hélice proporcionan momento descendente al aire. Aplica la ley de conservación del momento a esta situación.

Enlace con la teoría del conocimiento

Las reglas pueden restringir la imaginación

Las leyes de conservación ¿restringen o favorecen el desarrollo de la física?

La «simplicidad» de las leyes de conservación y el hecho de que se puedan aplicar de forma general las hace muy útiles y muy interesantes desde el punto de vista conceptual. Sin embargo, se podría argumentar que su aceptación incondicional entre los científicos puede llegar a impedir la consideración de nuevas perspectivas e ideas.

Colisiones elásticas, colisiones inelásticas y explosiones

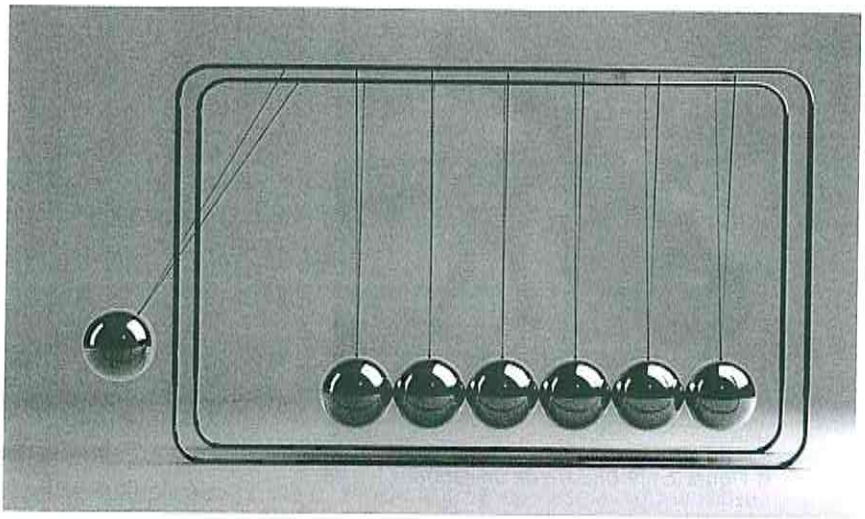
Cuando los objetos entran en contacto (es decir, interactúan), y se ejercen fuerzas mutuamente durante periodos de tiempo relativamente cortos, hablamos de «colisiones». Normalmente cabe esperar que en una colisión parte (o la totalidad) de la energía cinética de los objetos macroscópicos se disipe, pero es importante definir el *caso extremo*:

Hablamos de **colisión elástica** cuando la energía cinética total de las masas es la misma antes y después de la colisión.

En la vida diaria, en el mundo a gran escala, las *colisiones elásticas* son imposibles porque siempre se disipa algo de energía hacia el entorno.

El momento se conserva en *todas* las colisiones y en el caso teórico extremo de una colisión elástica, también se conserva la energía cinética. Las dos ecuaciones de conservación que representan esta situación se pueden combinar de forma simultánea para predecir exactamente qué sucedería si tuviera lugar una colisión elástica (pero *no* es temario de este curso). Por ejemplo, si una masa colisiona elásticamente con otra masa idéntica en reposo, la única posibilidad es que la masa en movimiento se detenga y la otra masa salga despedida con la misma velocidad que la primera. El propósito científico del péndulo de Newton (Figura 2.138) es justamente demostrar este efecto.

Figura 2.138
Péndulo de Newton



Las colisiones en las que parte (o la totalidad) de la energía cinética se transfiere en otras formas de energía se denominan **colisiones inelásticas**. Todas las colisiones de los objetos cotidianos son inelásticas.

Una colisión en la que los objetos se quedan pegados se denomina **colisión totalmente inelástica**.

En una «explosión», las masas que estaban originalmente en reposo relativo son propulsadas en distintas direcciones, de manera que la energía cinética después de la explosión es mayor que antes de esta. Atendiendo a la definición, este tipo de interacción claramente no se puede describir como una colisión *elástica* pero sí sería análoga a una colisión totalmente *inelástica* al revés.

Se puede estudiar fácilmente el porcentaje de conservación de la energía cinética total en colisiones entre masas que se desplazan por una misma recta midiendo las masas y sus velocidades antes y después del impacto, aunque para que los resultados sean fiables se necesita una superficie con muy baja fricción. Es instructivo investigar cómo varían los resultados obtenidos en función de las masas y/o la naturaleza de las superficies de colisión. Habitualmente los objetos fabricados con materiales elásticos, como el acero y el caucho, conservan la mayor parte de la energía cinética. (Recordemos que los materiales elásticos recuperan su forma original una vez se deja de aplicar la fuerza que actuaba sobre ellos). Y a la inversa, los materiales inelásticos se deforman permanentemente y gran parte de la energía se disipa en forma de energía interna y energía térmica.

Cuando se trata de moléculas individuales no tiene sentido utilizar los conceptos de energía interna, sonido y deformación para describirlas. Por tanto, a escala microscópica, las colisiones entre partículas (como las moléculas de un gas) son generalmente elásticas y se pueden modelizar fácilmente mediante simulaciones de ordenador.

156 Una vagoneta de masa 8340 kg que viaja a $14{,}3\,m\,s^{-1}$ colisiona con otra vagoneta de masa 6420 kg que viaja a $8{,}78\,m\,s^{-1}$ en la misma dirección.

a Si después de la colisión ambas vagonetas se quedan pegadas, ¿cuál es su velocidad inicial?

b Calcula el porcentaje de energía cinética que se conserva en la colisión.

157 Un carrito de masa 2,0 kg se mueve a una velocidad de $1{,}3\,m\,s^{-1}$ directamente hacia otro carrito en reposo de masa 1,0 kg.

a Si inmediatamente después de la colisión el carrito de 1 kg se mueve a una velocidad de $1{,}4\,m\,s^{-1}$, ¿cuál es la velocidad del otro carrito?

b Calcula la cantidad de energía disipada en esta colisión.

158 Si en la pregunta anterior la velocidad del carrito de 1 kg después de la colisión fuera de $4{,}1\,m\,s^{-1}$ (en lugar de $1{,}4\,m\,s^{-1}$), explica por qué todavía se podría calcular la respuesta al apartado **a** pero no así la del apartado **b**.

159 Un cañón de masa 1100 kg dispara un proyectil de masa 6,2 kg a una velocidad de $190\,m\,s^{-1}$ (Figura 2.139).

■ **Figura 2.139** *Disparo de un cañón*

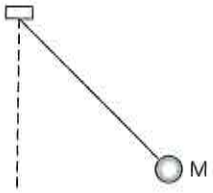
a Calcula la velocidad de retroceso inicial del cañón.

b El objetivo de disparar el cañón es transferir energía química del explosivo a energía cinética del proyectil, pero también se le transfiere energía cinética al cañón. Calcula el porcentaje de energía cinética que se lleva el proyectil.

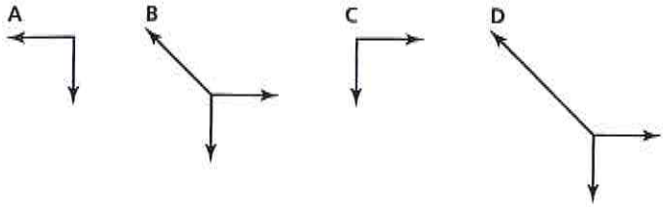
Selección de preguntas de examen

Hoja 1 preguntas del IB y preguntas tipo IB

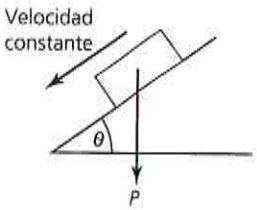
1 En el extremo de una cuerda ligera se encuentra una pequeña masa M, que ha sido desplazada lateralmente mediante una fuerza que la mantiene en estado de reposo.



¿Cuál de los cuatro diagramas siguientes reproduce con exactitud el diagrama de cuerpo libre que representa las fuerzas que actúan sobre la masa?



2 Un objeto de peso P se desliza hacia abajo por una pendiente (plano inclinado) que forma un ángulo θ con la horizontal. Si el objeto se mueve a velocidad constante, ¿cuál es el módulo de la fuerza de fricción en sentido ascendente?



A. P
B. $P \operatorname{sen} \theta$
C. $P \cos \theta$
D. $\frac{P}{2}$

3 El trabajo realizado cuando una fuerza constante actúa sobre una masa es siempre igual a:

A. la magnitud de la fuerza multiplicada por la distancia que se ha desplazado la masa
B. la magnitud de la fuerza multiplicada por el desplazamiento perpendicular a la fuerza
C. la magnitud de la fuerza multiplicada por el desplazamiento en la dirección de la fuerza
D. el vector suma de la fuerza más la distancia que se ha desplazado la masa.

4 Un cohete está viajando por el espacio cuando su motor eyecta gases de masa total m en un tiempo t. La velocidad relativa de los gases respecto al cohete es v.
¿Cuál de las expresiones siguientes es la que representa correctamente la fuerza ejercida por los gases sobre el cohete?

A. mv
B. $\frac{mv}{2}$
C. mvt
D. $\frac{mv}{t}$

5 ¿Cuál de las siguientes expresiones corresponde a la definición correcta de la velocidad instantánea de un objeto en movimiento en un instante *t*?

A. $\frac{\text{distancia recorrida}}{\text{tiempo invertido}}$

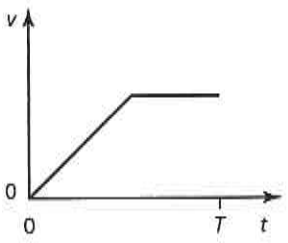
B. $\frac{\text{desplazamiento}}{\text{tiempo invertido}}$

C. tasa de cambio del desplazamiento en el instante *t*

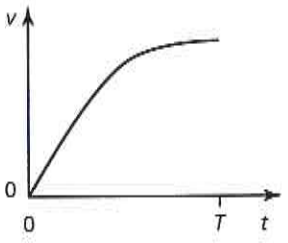
D. tasa de cambio de la distancia en el instante *t*.

6 Se deja caer un objeto grande desde un lugar elevado. El objeto impacta contra el suelo en el instante *T* después de su caída. ¿Cuál de los gráficos siguientes representa mejor la variación de la velocidad del objeto, *v*, con respecto al tiempo, *t*, justo antes del impacto contra el suelo?

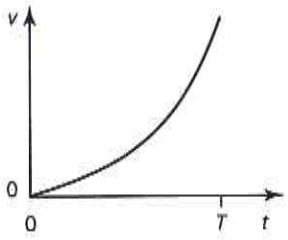
A



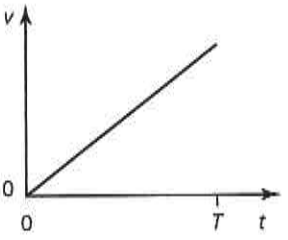
B



C



D



7 Cuando se compara el movimiento de dos coches, se determina que el coche A es más potente que el coche B. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes debe cumplirse?

A. El coche A produce más energía útil que el coche B.

B. El coche A produce una fuerza mayor que el coche B.

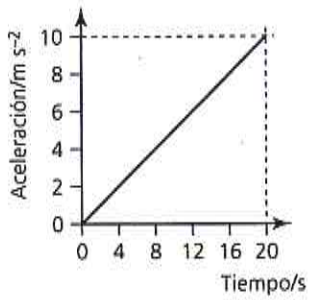
C. En un mismo periodo de tiempo, el coche A realiza más trabajo útil que el coche B.

D. En un mismo periodo de tiempo, el coche A recorre una mayor distancia que el coche B.

8 Se empuja una masa de 5 kg para que suba por una pendiente a una velocidad constante de $2\,m\,s^{-1}$. Cuando alcanza una altura vertical de 4 m, el trabajo total realizado es de 1200 J. El trabajo empleado en vencer la fricción es de:

A. 1000 J **B.** 200 J **C.** 2400 J **D.** 1400 J

9 Sobre un objeto actúa una fuerza creciente y la aceleración aumenta a su vez tal como se muestra en la gráfica.



Si el objeto se encontraba inicialmente en reposo, ¿cuál será su velocidad al cabo de 20 segundos?

A. $0{,}5\,m\,s^{-1}$ **B.** $2{,}0\,m\,s^{-1}$ **C.** $100\,m\,s^{-1}$ **D.** $200\,m\,s^{-1}$

10 Si sobre un objeto no actúa ninguna fuerza resultante, ¿cuál de las magnitudes siguientes también debe ser igual a cero?

A. rapidez **B.** velocidad **C.** aceleración **D.** momento

11 Un motor eléctrico levanta una masa de 2,5 kg una distancia de 12 m en un tiempo de 6 s. Si la eficiencia del proceso es del 20%, ¿cuál es la potencia de entrada del motor?

A. 10 W **B.** 25 W **C.** 250 W **D.** 500 W

12 Una masa se mueve a una velocidad constante con una energía cinética E_C. ¿Cuál es la energía cinética de otra masa que es el doble de la primera y que lleva la mitad de su velocidad?

A. $\frac{E_c}{2}$ **B.** E_c **C.** $2E_c$ **D.** $4E_c$

13 Un vehículo sube por una colina a velocidad constante. ¿Cuál de las expresiones siguientes describe mejor los cambios de energía asociados?

A. La energía química se convierte en energía potencial gravitatoria.
B. La energía química se convierte en energía potencial gravitatoria, sonido y energía térmica.
C. La energía potencial gravitatoria se convierte en energía química.
D. La energía potencial gravitatoria se convierte en energía química, sonido y energía térmica.

© *IB Organization*

14 Un peso *P* se suspende del techo colgándolo del extremo de un trozo de cuerda. Según la tercera ley del movimiento de Newton debe haber otra fuerza igual y de sentido contrario al peso. Esta segunda fuerza es:

A. La fuerza hacia abajo que ejerce la cuerda sobre el techo.
B. La fuerza hacia arriba que ejerce la cuerda sobre el peso.
C. La fuerza hacia arriba que ejerce el peso sobre la Tierra.
D. La tensión de la cuerda.

15 Se lanza una piedra al aire con un cierto ángulo respecto a la horizontal. Si consideramos que la resistencia del aire es despreciable, ¿cuál de las siguientes cantidades *no* permanece constante mientras la piedra se está moviendo por el aire?

A. la componente horizontal de la velocidad
B. la componente vertical de la velocidad
C. la energía total de la piedra
D. la aceleración de la piedra.

16 Se deja caer una bola de acero que estaba en reposo en el interior de un cilindro que contiene aceite. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes es incorrecta?

A. La fuerza que se opone al movimiento se llama resistencia aerodinámica.
B. Si el cilindro es lo bastante largo la bola alcanzará su velocidad terminal.
C. El peso de la bola se reducirá dentro del aceite.
D. Una bola más grande experimentará una mayor fuerza resistiva.

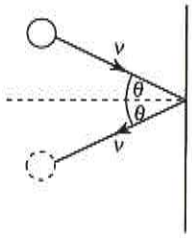
17 Cuando un muelle de acero en reposo se alarga 10 cm, la energía potencial elástica almacenada en su interior es 0,20 J. ¿Cuál es la constante de fuerza del muelle?

A. $4{,}0 \times 10^{-3}\,\mathrm{N\,m^{-1}}$
B. $4{,}0\,\mathrm{N\,m^{-1}}$
C. $10\,\mathrm{N\,m^{-1}}$
D. $40\,\mathrm{N\,m^{-1}}$

18 Se deja caer una pelota sobre una superficie dura y los alumnos determinan que se trata de una colisión elástica. Para que esto sea cierto, la pelota debe:

A. rebotar hasta la misma altura desde la que se dejó caer
B. estirarse mucho
C. estar fabricada de caucho
D. calentarse.

19 Un átomo de gas que lleva una velocidad v impacta contra una pared con un ángulo θ respecto a la normal de la pared. El átomo rebota con la misma velocidad v y ángulo θ.



¿Cuál de las respuestas siguientes da el módulo del cambio de momento del átomo de gas?

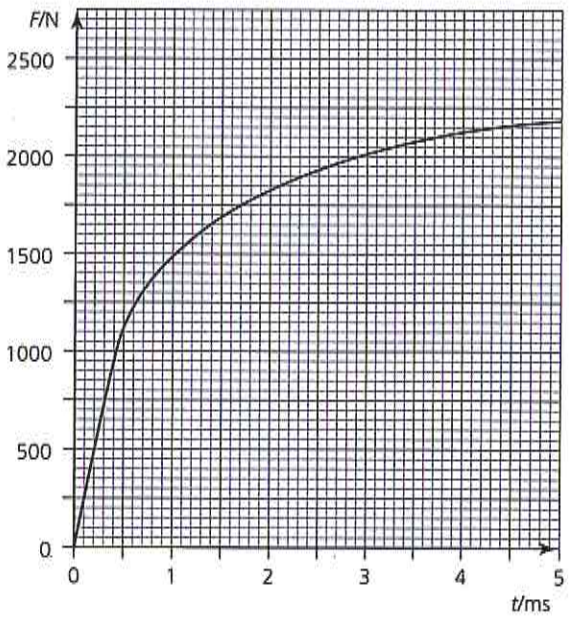
A. cero
B. $2mv\,\text{sen}\,\theta$
C. $2mv$
D. $2mv\cos\theta$

© IB Organization

Hoja 2 preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 Se dispara una bala de masa 32 g con un fusil. En la gráfica se representa la variación de la fuerza F sobre la bala con respecto al tiempo t cuando la bala atraviesa el cañón del fusil.

A.

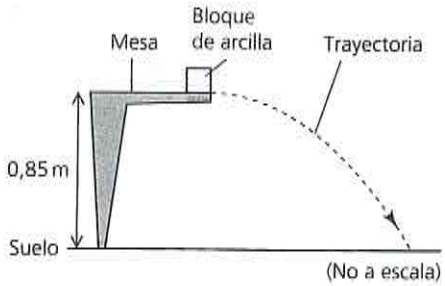


La bala se dispara en el instante de tiempo $t = 0$ y la longitud del cañón es 0,70 m.

a. Explica por qué no es adecuado utilizar la ecuación $e = ut + {}^1/_2\,at^2$ para calcular la aceleración de la bala. (2)
b. Utiliza la gráfica para:
  i. determinar la aceleración media de la bala durante los últimos 2,0 ms de la gráfica (2)
  ii. demostrar que el cambio en el momento de la bala cuando atraviesa la longitud del cañón es aproximadamente 9 N s. (3)
c. Utiliza la respuesta al apartado **b ii** para calcular:
  i. la velocidad de la bala cuando sale del cañón (2)
  ii. la potencia media que se le ha proporcionado a la bala. (3)
d. Utiliza la tercera ley de Newton para explicar por qué retrocede el fusil cuando se dispara la bala. (3)

© IB Organization

2 Un bloque de arcilla que se encuentra inicialmente en el extremo de una mesa sale disparado de esta tal como se muestra en el diagrama.



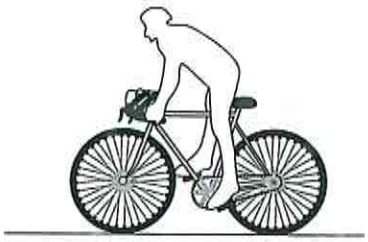
La velocidad inicial del bloque de arcilla es $4{,}3\,m\,s^{-1}$ horizontalmente. La superficie de la mesa se encuentra a 0,85 m del suelo.

a. Sin tener en cuenta la resistencia del aire, calcula la distancia horizontal recorrida por el bloque de arcilla antes de que impacte contra el suelo. (4)

b. En el diagrama se representa la trayectoria del bloque de arcilla cuando no se tiene en cuenta la resistencia del aire. Copia el diagrama y dibuja sobre él la forma aproximada de la trayectoria que seguiría el bloque de arcilla si tuviéramos en cuenta la acción de la resistencia del aire. (3)

© *IB Organization*

3 **a.** Consideremos el sistema formado por un ciclista y su bicicleta viajando a velocidad constante por una vía horizontal.



i. Enuncia el valor de la fuerza neta que actúa sobre el ciclista. (1)

ii. Haz una copia del diagrama y dibuja flechas convenientemente etiquetadas que representen las fuerzas verticales que actúan sobre la bicicleta. (2)

iii. Con referencia a las fuerzas horizontales que actúan sobre el sistema, explica por qué este viaja a velocidad constante. (2)

b. La fuerza resistiva total que actúa sobre el sistema es de 40 N y su velocidad es de $8{,}0\,m\,s^{-1}$. Calcula la potencia de salida útil del ciclista. (1)

c. El ciclista deja de pedalear y el sistema se queda en reposo. La masa total del sistema es de 70 kg.

i. Calcula el módulo de la aceleración lineal del sistema. (2)

ii. Estima la distancia que recorre el sistema desde el momento en que el ciclista deja de pedalear hasta que se queda en reposo. (2)

iii. Enuncia y explica un motivo por el que tu respuesta al apartado **c ii** es solo una estimación. (2)

© *IB Organization*

4 **a.** Explica la diferencia entre los coeficientes estáticos de fricción y los coeficientes dinámicos de fricción. (2)

b. Un cubo metálico está en reposo sobre un plano inclinado de madera con una superficie lisa. El ángulo que forma el plano inclinado con la horizontal se va aumentando lentamente justo hasta que el cubo comienza a deslizarse por la pendiente. Si el coeficiente de fricción estática entre ambas superficies es 0,56, ¿cuál es el mayor ángulo posible que puede tener el plano inclinado antes de que el cubo comience a deslizarse? (2)

3 Física térmica

IDEAS FUNDAMENTALES

- La física térmica explica con claridad las relaciones existentes entre las medidas macroscópicas obtenidas en los diversos modelos científicos y las propiedades microscópicas que subyacen en dichos modelos.
- Las propiedades de los gases ideales permiten a los científicos establecer predicciones acerca del comportamiento de los gases reales.

3.1 Conceptos térmicos

La física térmica explica con claridad las relaciones existentes entre las medidas macroscópicas obtenidas en los diversos modelos científicos y las propiedades microscópicas que subyacen en dichos modelos

Teoría molecular de los sólidos, líquidos y gases

El conocimiento de la composición particulada de la materia es esencial para el establecimiento de los principios fundamentales que rigen la física, la química y muchas otras disciplinas de la ciencia.

- En los **sólidos**, las moléculas (o los átomos o los iones) se mantienen muy cercanas gracias a la acción de fuerzas de intensidad elevada, habitualmente siguiendo patrones regulares. Las partículas vibran alrededor de sus posiciones medias. Véase la Fig. 3.1.
- En los **líquidos**, las moléculas todavía vibran, pero las fuerzas de interacción molecular pueden ser vencidas, lo que permite a las moléculas desplazarse un poco. Las moléculas permanecen casi tan cercanas como en el caso de los sólidos, pero apenas se produce regularidad en su disposición e incluso no se produce en absoluto, ya que la disposición cambia constantemente.
- En los **gases**, las moléculas están mucho más separadas que en los sólidos o en los líquidos, y las fuerzas de interacción molecular son muy débiles, incluso despreciables (excepto en el caso de colisión molecular). Como consecuencia, las moléculas se mueven de forma independiente y en direcciones aleatorias, siguiendo un amplio intervalo de velocidades (habitualmente elevadas). Las velocidades cambian constantemente como resultado de las colisiones.

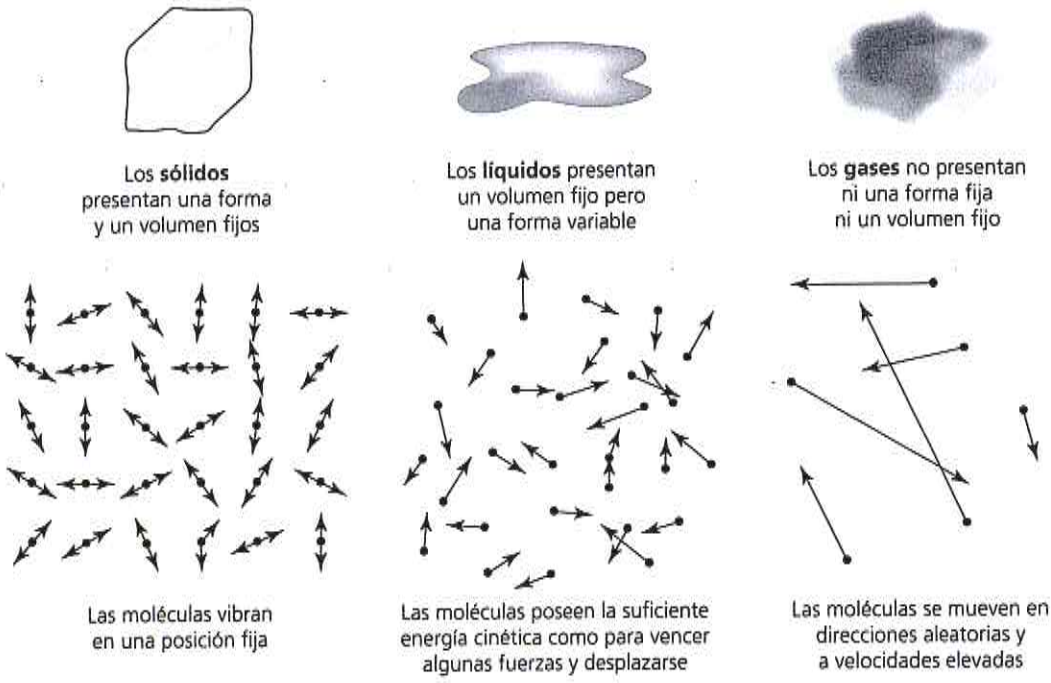


Figura 3.1
Diferencias entre sólidos, líquidos y gases; las flechas representan las velocidades de las moléculas

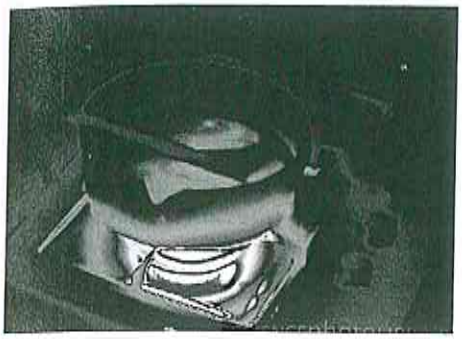


Figura 3.2 *En este termograma, obtenido mediante radiación infrarroja, se utilizan colores para mostrar las distintas temperaturas que se alcanzan en una cacerola sobre un fogón. La escala va desde el blanco (más caliente) hasta el rosa (más frío), pasando por el rojo, el amarillo, el verde y el azul*

Energía térmica y diferencias de temperatura

La energía térmica se define como la energía transferida desde un punto más caliente a otro más frío como consecuencia de una diferencia de temperatura. A la **energía térmica** se la suele denominar «calor», pero esta denominación puede resultar confusa, porque el término calor se emplea de forma habitual y *erróneamente* para nombrar la energía que hay *en el interior* de la materia. La energía que hay en el interior de la materia se denomina **energía interna**.

Los objetos intercambian continuamente energía con el medio que los rodea. Un objeto que está más caliente que el medio desprende (*emite*) más energía de la que capta y un objeto que está más frío que el medio capta (*absorbe*) más energía de la que desprende.

En la Figura 3.2 se muestran las diferencias de temperatura que existen entre una cacerola y un fogón y que dan lugar a un flujo de energía térmica. La energía térmica *siempre* se transfiere desde una temperatura más alta hacia una temperatura más baja.

La **temperatura** determina la dirección de la transferencia neta de energía térmica entre dos objetos.

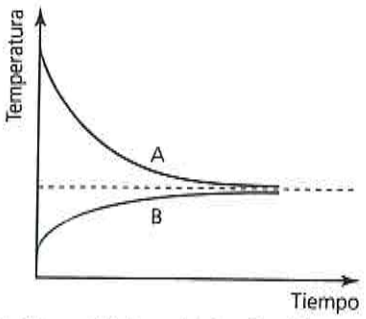


Figura 3.3 *Dos objetos (A y B) a diferentes temperaturas y aislados de su entorno (pero no entre sí) alcanzarán el equilibrio térmico*

Consideremos a continuación el ejemplo simple de dos objetos (o sustancias) a diferentes temperaturas y capaces de transferirse energía térmica, aunque aislados de todo aquello que les rodea (su *entorno*). El objeto más caliente transfiere energía al más frío, enfriándose. Simultáneamente, el objeto más frío se calienta. A medida que la diferencia de temperatura entre ambos objetos disminuye, otro tanto le ocurre a la *tasa* de energía térmica transferida. Este fenómeno se representa en la Figura 3.3, que muestra cómo debería cambiar la temperatura de dos objetos (A y B) cuando se sitúan en contacto térmico. (Estar en «contacto térmico» significa que, de algún modo, pueden transferirse energía térmica). Finalmente, ambos objetos alcanzan la misma temperatura.

Si la temperatura ha dejado de cambiar y ambos objetos están a la misma temperatura, se dice que ambos objetos están en **equilibrio térmico** y en este caso no existe flujo neto de energía térmica entre ambos.

En una situación real no es posible aislar completamente dos objetos de su entorno, de manera que el equilibrio térmico se convierte en un concepto ideal. La idea de que los objetos más calientes se enfríen y los más fríos se calienten sugiere un concepto importante: al final, *todo* acabará teniendo la misma temperatura.

Temperatura y temperatura absoluta

Las escalas de temperatura que se utilizan en la actualidad fueron diseñadas en función de su simplicidad y de su facilidad de reproducción. En la **escala Celsius (°C)**, a veces denominada escala centígrada, el valor 0 °C se define como la temperatura a la que el agua pura se convierte en hielo (a una presión atmosférica normal), y el valor 100 °C se define como la temperatura a la que el agua pura hierve (a una presión atmosférica normal). Es importante tener en cuenta que esta escala de temperatura fue diseñada por conveniencia, es decir, que estos valores fueron *escogidos*, no fueron descubiertos. En particular, el valor 0 °C no es en absoluto un valor «cero» de temperatura ni un valor «cero» de energía. No tiene otro significado que el de corresponder a la temperatura de fusión del hielo. (Por ejemplo, un objeto a 10 °C no puede considerarse «dos veces más caliente» que un objeto a 5 °C).

La escala de temperatura Celsius se utiliza en todo el mundo y representa un buen ejemplo de que la efectividad de la comunicación de datos entre las diversas personas y países depende en gran medida de haber acordado un sistema de unidades. Por motivos históricos y culturales, hay unos pocos países (en especial los EE. UU.) en los que todavía se utiliza la escala Fahrenheit de temperatura.

Una vez se predijo que prácticamente todo movimiento molecular se detiene a la temperatura de –273 °C tuvo sentido establecer este valor como el verdadero «cero» de la temperatura. A esta temperatura se la denomina habitualmente **cero absoluto**.

La **escala de temperatura (absoluta) Kelvin** corresponde a una adaptación de la escala Celsius en la que el valor «cero» se sitúa en –273 °C (para ser más exactos, en –273,15 °C). En esta escala la unidad se denomina **kelvin, cuyo símbolo es K** (y no °K). Los *cambios* correspondientes a la temperatura de 1°C y 1 K se escogieron de modo que fueran idénticos, lo que permite una conversión más directa entre los valores de una escala y otra:

$$T/\mathrm{K} = \theta/°\mathrm{C} + 273$$

En la ecuación anterior cabe destacar que el uso del símbolo T para la temperatura implica el uso de la escala Kelvin y que el símbolo θ implica, a su vez, el uso de la escala Celsius. En la Tabla 3.1 se comparan los valores de algunas temperaturas importantes en ambas escalas.

Cuando se realizan cálculos referidos a *cambios* de temperatura se pueden emplear ambas escalas, tanto la Celsius como la Kelvin, pero es importante recordar que cuando los cálculos se refieren a una única temperatura, debe utilizarse la escala Kelvin.

■ **Tabla 3.1** *Comparación de temperaturas en grados Celsius y kelvin*

Temperatura	°C	K
Cero absoluto	–273	0
Punto de fusión del agua	0	273
Temperatura corporal	37	310
Punto de ebullición del agua	100	373

Ejemplo resuelto

1 El punto de congelación del mercurio en condiciones de presión atmosférica normal es –39 °C. ¿A cuántos kelvin equivale esta temperatura?

$T/\mathrm{K} = \theta/°\mathrm{C} + 273$

$T = -39 + 273$

$T = 234\,\mathrm{K}$

1 a La temperatura mundial más alta y más baja documentadas corresponden respectivamente a los valores 57 °C (en California) y –89 °C (en la Antártida). ¿A cuántos kelvin equivalen estos valores?
b La temperatura de una masa de agua aumenta de 17 °C a 55 °C. ¿Cuál es el aumento de temperatura en kelvin?

2 a El volumen de un gas es 37 cm^3 a una temperatura de 23 °C. Si el volumen es proporcional a la temperatura absoluta (K), a qué temperatura en °C corresponderá un volumen de 50 cm^3?
b ¿Cuál será el volumen cuando el gas esté a –15°C?

Energía interna

Toda sustancia contiene partículas en movimiento. En el contexto de este capítulo, la palabra «partícula» es un término general que puede aplicarse tanto a una molécula como a un átomo o a un ion. Aunque los diversos tipos de sustancias pueden contener cualquiera de estas «partículas» o todas ellas, la mayoría de las sustancias son *moleculares*, de modo que en lo que queda de capítulo el término «molécula» se utilizará para describir las partículas de cualquier sustancia.

Las moléculas en movimiento poseen *energía cinética*. Las moléculas pueden moverse de distintas maneras, lo que da lugar a tres formas distintas de energía cinética molecular aleatoria:

- Las moléculas pueden vibrar alrededor de posiciones fijas (como en el caso de un sólido) –las moléculas tienen **energía cinética de vibración**.
- Las moléculas pueden desplazarse de un lugar a otro (movimiento de traslación) –las moléculas tienen **energía cinética de traslación**.
- Las moléculas también pueden girar (rotar) –las moléculas tienen **energía cinética de rotación**.

Las moléculas pueden poseer *energía potencial* además de energía cinética. En sólidos y en líquidos son las *fuerzas eléctricas* (entre las partículas cargadas) las que impiden que las moléculas se separen o se muevan muy cerca unas de otras. Si hay fuerzas eléctricas habrá energía potencial en el sistema, del mismo modo que la energía potencial gravitatoria se asocia a la fuerza gravitatoria.

En los gases, sin embargo, las fuerzas entre las moléculas suelen ser despreciables debido a la mayor separación entre moléculas. Por este motivo, las moléculas de un gas pueden desplazarse libremente y de forma aleatoria. Así, las moléculas de un gas poseen habitualmente una energía potencial eléctrica despreciable, de modo que la totalidad de la energía aparece en forma de energía cinética.

Por tanto, para expresar la energía total de las moléculas de una sustancia necesitamos tener en cuenta tanto la energía cinética como la potencial. Este valor total se denomina *energía interna* de la sustancia y se define de la manera siguiente:

La **energía interna** de una sustancia es la suma de la energía cinética aleatoria total más la energía potencial intermolecular total del conjunto de las moléculas que hay en el interior de la sustancia.

Es importante no confundir el término «energía interna» con el término «calor». Es decir, no debe emplearse el término «energía térmica» (o calor) para referirse a la energía interna.

En la definición de energía interna que se ha establecido anteriormente, la palabra «aleatoria» significa que los movimientos moleculares son **desordenados** e impredecibles. Es decir, no están asociados de ningún modo entre sí ni siguen un **orden**, como ocurriría si se estuvieran moviendo conjuntamente, como ocurre en las moléculas de un movimiento macroscópico como es el de un coche que se desplaza. En este caso las moléculas poseen tanto la energía cinética «ordenada» correspondiente al movimiento macroscópico como la energía cinética «aleatoria» correspondiente a la energía interna.

Resumen de las diferencias entre temperatura, energía interna y energía térmica

Los conceptos de temperatura, energía interna y energía térmica se utilizan de forma habitual y son conceptos muy importantes en todas las disciplinas científicas, aunque se suelen malinterpretar y utilizar de forma errónea. Para recalcar su importancia, podemos establecer el siguiente resumen en el que se describe su significado.

- La *energía interna* es la energía total (cinética aleatoria y potencial) del conjunto de moléculas que hay en el interior de una sustancia.
- Si la energía se transfiere a una sustancia, ésta adquiere energía interna y sus moléculas se mueven más rápido. Decimos en este caso que la sustancia *se ha calentado*, lo que se mide como un *incremento de temperatura*. En la página 127 se establece una definición más precisa del concepto temperatura.
- La *energía térmica* (calor) es la energía que fluye desde una temperatura más alta a una más baja.

En un caso concreto, al objeto o sustancia que estamos considerando se le denomina **sistema**, y la energía térmica fluye entre el sistema y su **entorno**. Los alumnos saben que la energía térmica se transfiere por **conducción**, **convección** y **radiación**, aunque en este capítulo no es necesario conocer en detalle estos procesos, que se describen más adelante, en el Capítulo 8.

En la Figura 3.4 la energía térmica se conduce desde una mano a la otra.

Figura 3.4
Una mano recibe la energía térmica que desprende la otra

Enlace con la teoría del conocimiento

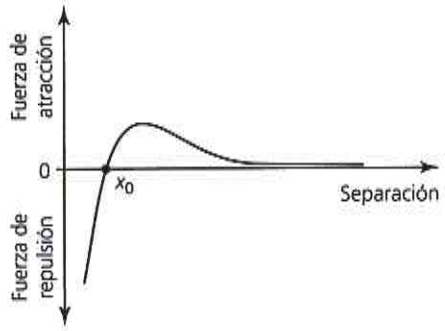
Percepción sensorial

La observación a través de la percepción sensorial desempeña un papel clave a la hora de realizar medidas. ¿Desempeña la percepción sensorial distintos papeles en distintas áreas de conocimiento?

El significado científico de la temperatura está asociado a las energías moleculares microscópicas, pero nuestra apreciación de la temperatura se basa ampliamente en nuestras **percepciones sensoriales** diarias de calor y frío (que son claramente poco fiables). ¿Nos ayuda este hecho o nos entorpece a la hora de comprender qué es la temperatura? ¿Qué otras áreas del conocimiento son tan dependientes de la información proporcionada directamente por el cuerpo a través de los sentidos del tacto, la vista, el oído, etc.?

3 Dos masas iguales de dos sólidos distintos a 20 °C se calientan hasta 40 °C.
a Razona si ambas masas poseen la misma cantidad inicial de energía interna.
b Razona si se ha transferido la misma cantidad de energía térmica a ambas masas.

4 En la Figura 3.5 se representa la variación de la fuerza resultante entre dos moléculas respecto a su separación; x_0 corresponde a la separación de equilibrio media entre moléculas en un sólido. Las moléculas de un gas están habitualmente diez veces más separadas que las de un sólido.



■ **Figura 3.5** *Variación de la fuerza intermolecular respecto a la separación molecular*

a Describe cómo cambia la fuerza resultante entre moléculas (en sus posiciones de equilibrio) si éstas se mueven:
i separándose unas de otras.
ii acercándose unas a otras.
b ¿Qué se puede concluir a partir de esta gráfica sobre la intensidad de las fuerzas entre las moléculas de un gas y la de las fuerzas entre las moléculas de un sólido?
c Explica por qué cabe esperar que la densidad de los gases sea aproximadamente 10^3 veces menor que la de los sólidos.

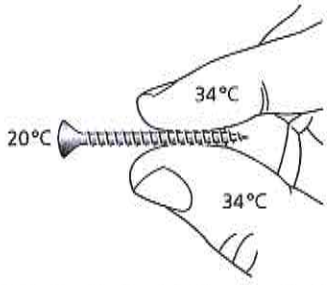
5 Las chispas emitidas por una bengala (Figura 3.6) están muy calientes. Explicar por qué no suelen causar daños cuando caen sobre una persona o su ropa. Utilizar los términos «temperatura», «energía interna» y «energía térmica» en el razonamiento. (La bengala puede ocasionar quemaduras si se toca directamente)

■ **Figura 3.6** *¡Las bengalas no suelen ser tan peligrosas como parecen!*

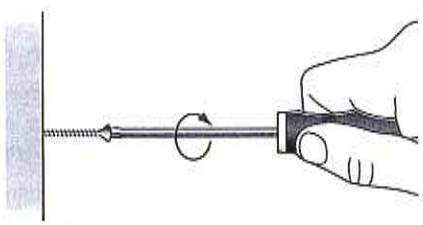
■ Calor y trabajo

Además de aportar energía térmica a un sistema («calentarlo»), existe otro método muy habitual y fundamentalmente distinto de calentar algo: podemos ejercer *trabajo mecánico* sobre el sistema. Un ejemplo simple es el de la fuerza de fricción que produce un aumento de temperatura cuando una superficie se frota contra otra. El calentamiento es una transferencia *no mecánica* de energía.

En las Figuras 3.7 y 3.8 se muestran ejemplos de estos modos distintos de aumentar la temperatura de un objeto. En la Figura 3.7, la energía interna de un tornillo aumenta a medida que gana energía térmica procedente de la mano que lo sujeta. En la Figura 3.8, su energía interna aumenta porque se ejerce una fuerza que hace girar el tornillo para introducirlo en un trozo de madera y que va en sentido contrario a las fuerzas que se oponen a esta introducción, ejerciéndose en este caso un trabajo mecánico.



■ **Figura 3.7** *Calentamiento debido al contacto con algo que está a una temperatura más alta*



■ **Figura 3.8** *Calentamiento debido a que se está ejerciendo un trabajo*

Perspectivas adicionales

Comprender el concepto de calor: James Prescott Joule

La unidad de energía del SI se denomina Joule en honor del británico James Prescott Joule (Figura 3.9), un físico del siglo XIX que además regentaba una fábrica de cerveza. Su experiencia como cervecero pudo haber contribuido a su reconocida habilidad para realizar medidas de precisión, en especial las relacionadas con cambios de temperatura.

A mediados del siglo XIX se creía que el «calor» era un «fluido calórico» indetectable que fluía desde los objetos calientes a los fríos. Joule intentó repetidamente demostrar que el «calor» era, simplemente, otra forma de energía que podía ser transferida de otras muchas formas, por ejemplo como energía cinética o como energía potencial gravitatoria.

Figura 3.9
James Prescott Joule

En particular, se le recuerda por sus experimentos sobre la «equivalencia mecánica del calor», en los que se utilizaba energía mecánica para incrementar la temperatura del agua. Se dice que pasó parte de su luna de miel intentando medir una diferencia de temperatura muy pequeña entre la parte superior y la parte inferior de una cascada, ¡lo cual no es nada fácil!

Su obra permitió unir los conceptos de energía y «calor» y tuvo importancia en el posterior desarrollo de la ley de conservación de la energía y la primera ley de la termodinámica. Joule trabajó también con Lord Kelvin en termometría y escalas de temperatura.

1 El uso del término «calor» puede llevar a confusión, especialmente si se utiliza para representar tanto la energía del interior de los objetos como la energía que se transfiere. Discute el uso del término «calor» según esta perspectiva adicional.

Naturaleza de la ciencia

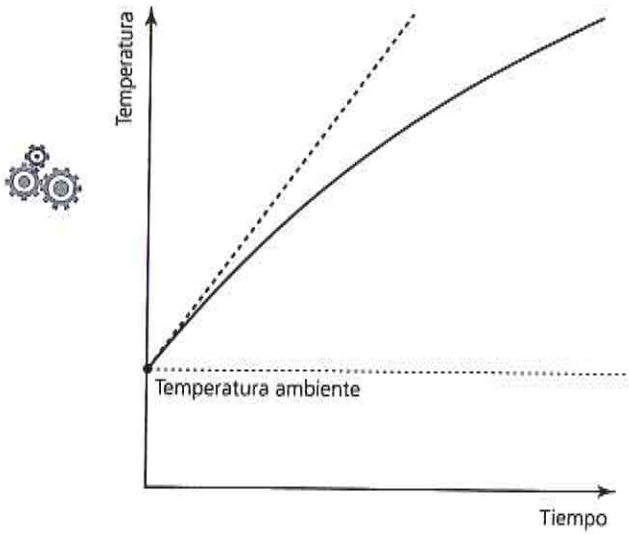
Las primeras ideas sobre el calor estaban limitadas por el desconocimiento de la naturaleza particulada de la materia

Hace apenas 200 años, el concepto de calor se describía en términos de un vago «**fluido calórico**» que fluía de un objeto caliente. Se trataba de un ejemplo más de una de las muchas teorías científicas serias que se desarrollaron para explicar los fenómenos observados, pero que nunca resultaban totalmente satisfactorias porque no podían explicar *todas* las observaciones. La antigua teoría del «**flogisto**» para explicar la combustión es otro ejemplo de teoría relacionada con el calor.

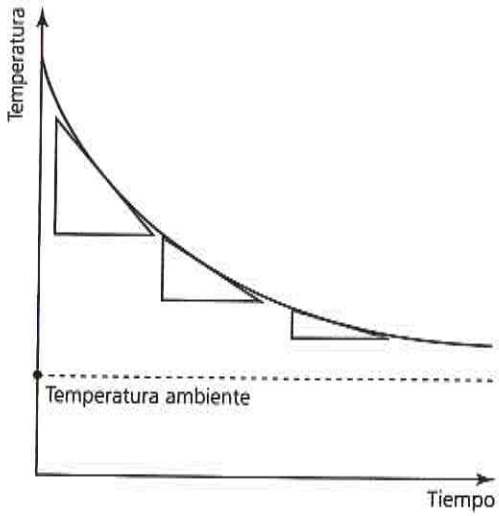
Desde la perspectiva del siglo XXI, estas teorías pueden parecer poco sofisticadas e inexactas (¡aunque imaginativas!). Sin embargo, deben juzgarse en el contexto de su época, y en aquel tiempo (siglos XVII y XVIII), la teoría molecular de la materia todavía no se había desarrollado, de modo que era imposible disponer de una comprensión del flujo de energía térmica como la que se tiene en la actualidad.

Gráficos de calentamiento y enfriamiento

La línea recta de puntos azules de la Figura 3.10 muestra cómo cambia la temperatura de un objeto calentado de forma constante en función del tiempo, bajo unas circunstancias ideales en las que no hay pérdida de energía térmica (calor). La temperatura aumenta de manera directamente proporcional al tiempo (a una cantidad igual de tiempo le corresponde una cantidad igual de aumento de temperatura). Sin embargo, las pérdidas de energía térmica hacia el entorno son inevitables, de modo que la línea curva roja representa una situación más realista. La curva muestra que la *tasa* de aumento de la temperatura decrece a medida que el objeto se calienta. Esto último se debe a que las pérdidas de energía térmica (desde el objeto hacia su entorno) aumentan cuando las diferencias de temperatura se hacen mayores. Si se continúa suministrando energía, el objeto acaba alcanzando una temperatura constante cuando se igualan la tasa de entrada de energía y la tasa de salida de energía térmica liberada hacia el entorno.



■ **Figura 3.10** *Representación gráfica típica de la variación de la temperatura respecto al tiempo en el caso de enfriamiento a una tasa constante*



■ **Figura 3.11** *Representación gráfica típica de la variación de la temperatura respecto al tiempo para un objeto que se enfría hasta la temperatura ambiente. Es importante remarcar que el gradiente decrece con el tiempo*

Cuando se deja enfriar un objeto de forma natural, la tasa de emisión de energía térmica disminuye con respecto al tiempo porque dicha tasa también depende de la diferencia de temperatura entre el objeto y su entorno. Esto último puede verse en la Figura 3.11, en la que la tasa de enfriamiento (representada como los gradientes en distintos instantes de tiempo) se hace cada vez menor.

■ Capacidad calorífica específica y capacidad térmica

Capacidad calorífica específica

Para comparar la respuesta al calentamiento de dos sustancias distintas necesitamos saber cuánta energía térmica incrementa la temperatura de una masa equivalente de cada una de las sustancias (habitualmente 1 kilogramo) en una misma cantidad (1 K o 1 °C). Esto es lo que se denomina *capacidad calorífica específica, c,* de la sustancia. (El término «específica» se utiliza para remarcar que la capacidad calorífica se refiere a una cantidad determinada de materia, concretamente 1 kg).

La **capacidad calorífica específica** de una sustancia es la cantidad de energía necesaria para incrementar en 1 K la temperatura de 1 kg de sustancia. (Unidades: J kg^{-1} K^{-1}, aunque puede utilizarse $°C^{-1}$ en lugar de K^{-1}).

En la Tabla 3.2 se proporcionan los valores de la capacidad calorífica específica de algunos materiales de uso frecuente.

■ **Tabla 3.2** *Algunas capacidades caloríficas específicas correspondientes a distintos materiales*

Material	Capacidad calorífica específica/J kg^{-1} K^{-1}
cobre	390
aluminio	910
agua	4180
aire	1000
tierra seca	1250
vidrio (habitual)	800
hormigón (habitual)	800

En pocas palabras, las sustancias con capacidades caloríficas elevadas se calientan lentamente, comparadas con masas equivalentes de sustancias con capacidades caloríficas más bajas (dada la misma energía de entrada). Análogamente, las sustancias con capacidades caloríficas elevadas se enfrían más lentamente. Cabe destacar que el agua posee una capacidad calorífica inusualmente elevada. Esta es la razón por la que es necesario transferir una gran cantidad de energía para cambiar la temperatura del agua, y la razón por la que el agua se utiliza de forma habitual para transferir energía en los sistemas de calentamiento y enfriamiento.

Si se suministra una cantidad de energía térmica, Q, a una masa, m, y se produce un incremento de temperatura ΔT, podemos calcular la capacidad calorífica específica a partir de la ecuación:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

(Recordemos que el símbolo «delta», Δ, se utiliza de forma habitual en ciencia y en matemáticas para representar un cambio pequeño en una cantidad).

Esta ecuación se suele escribir de la manera siguiente:

$$Q = mc\Delta T$$

Esta ecuación puede encontrarse en el *Apéndice de datos de Física*.

Cuando una sustancia se enfría, la energía térmica emitida se puede calcular mediante dicha ecuación.

La manera más simple de determinar experimentalmente la capacidad calorífica específica de una sustancia es mediante la aplicación de una cantidad conocida de energía procedente de un calentador eléctrico situado en su interior (inmerso en su interior). Este tipo de calentadores se denominan **calentadores de inmersión**. Para el caso de los líquidos es relativamente sencillo, pero para los sólidos suele ser necesario perforar un agujero en el material a fin de insertar el calentador y asegurar un contacto térmico apropiado.

En los dos experimentos que se muestran en las Figuras 3.12 y 3.13 se utiliza un **juliómetro** para medir directamente la energía transferida. (Habitualmente esta energía se puede calcular a partir de los circuitos eléctricos, mediante la ecuación: energía eléctrica = VIt, que se explica en el capítulo 5).

Figura 3.12 *Determinación de la capacidad calorífica específica de un metal*

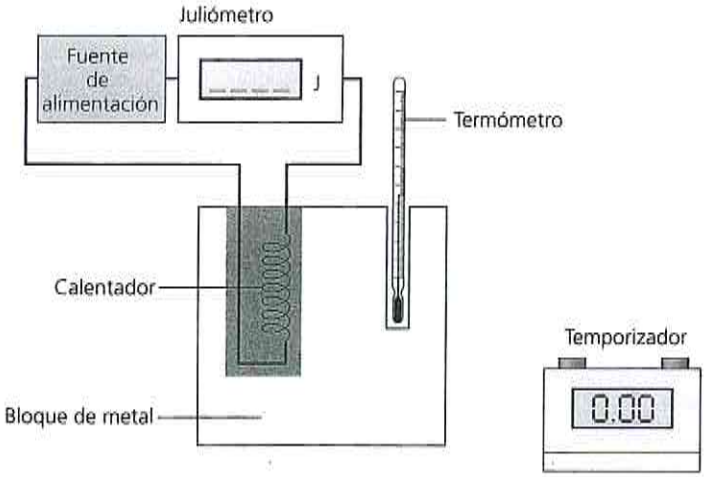
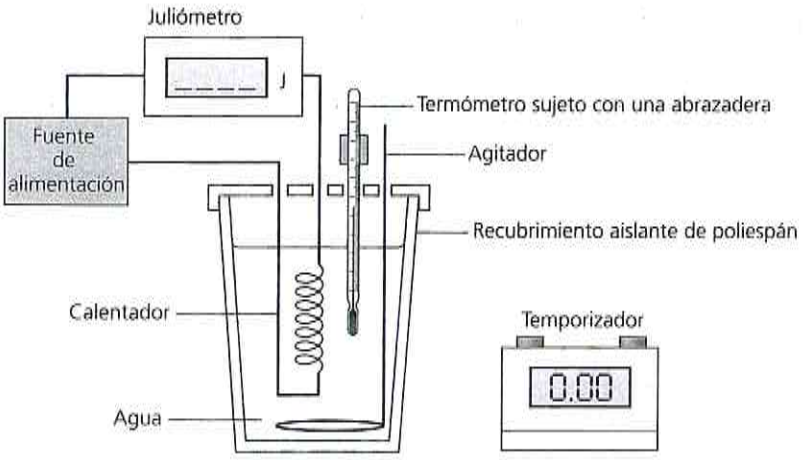


Figura 3.13 *Determinación de la capacidad calorífica específica del agua*



Ejemplo resuelto

2 Supongamos que el bloque de metal que se muestra en la Figura 3.12 tiene una masa de 1500 g y se calienta durante 5 minutos con un calentador de 18 W. Si la temperatura del bloque aumenta de 18,0 °C hasta 27,5 °C, calcula su capacidad calorífica específica, en el supuesto de que no se transfiera energía al entorno.

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

y

$$Q = Pt$$

por tanto,

$$c = \frac{18 \times (5 \times 60)}{1{,}5 \times (27{,}5 - 18{,}0)}$$

$$= 380\,\text{J kg}^{-1}\,\text{°C}^{-1}$$

Para la realización de estos cálculos debe suponerse que toda la sustancia se encuentra a la misma temperatura y que el termómetro la registra de forma exacta en los instantes relevantes. En la práctica, al no cumplirse dichas suposiciones, los valores calculados pueden ser significativamente inexactos.

Además, en cualquier experimento relacionado con transferencias de energía térmica y con cambios de temperatura se producen pérdidas (o ganancias) inevitables con respecto al entorno. Si se requieren unos resultados exactos, deben emplearse **aislantes** para limitar estas transferencias de energía, que en el ejercicio anterior hubieran conducido a una sobreestimación de la capacidad calorífica específica de la sustancia (dado que parte de la entrada de energía va al entorno en lugar de ir a la sustancia). El proceso para aislar una sustancia habitualmente consiste en envolverla con un material que retiene el aire (que es un mal conductor), y a este proceso se le suele denominar **revestimiento**.

Para las cuestiones siguientes, supón que no hay transferencia de energía hacia el entorno o desde este.

6 ¿Cuánta energía se necesita para incrementar en 54 °C la temperatura de un bloque de metal con una masa de 3,87 kg, si la capacidad calorífica del metal es de 456 J kg^{-1} K^{-1}?

7 ¿Cuál es la capacidad calorífica específica de un líquido que precisa 3840 J para incrementar en 18,0 K la temperatura de una masa de 156 g?

8 El aire tiene una densidad de 1,3 kg m^{-3} y una capacidad calorífica específica de 1000 J kg^{-1} °C^{-1}. Si se transfieren 500 kJ a una habitación de 80 m^3 de volumen, ¿cuál es el aumento de temperatura que se produce?

9 Se transfiere 1,0 MJ de energía a 15,0 kg de agua a 18 °C, ¿cuál será la temperatura final?

10 Se vierten 500 g de una bebida en un recipiente de cristal de 250 g (de capacidad calorífica específica 850 J kg^{-1} °C^{-1}) y este se introduce en un frigorífico. ¿Cuánta energía se le debe quitar para enfriar la bebida y el vaso desde 25 °C hasta 4 °C? (Supongamos que la bebida tiene la misma capacidad calorífica específica que el agua).

11 Se coloca un calentador de inmersión de 20 W en el interior de un bloque de hierro con una masa de 2,0 kg y una temperatura de 24 °C durante 12 minutos. ¿Cuál será la temperatura final? (Capacidad calorífica específica del hierro = 444 J kg^{-1} °C^{-1}).

12 ¿Cuánto tiempo tardará un hervidor de 2,2 kW en aumentar la temperatura de 800 g de agua desde 16,0 °C hasta su punto de ebullición?

13 Se coloca un aparato de aire acondicionado con una potencia de enfriamiento de 1200 W en una habitación que contiene 100 kg de aire (capacidad calorífica específica 1000 J kg^{-1} °C^{-1}) a 30 °C. ¿Qué temperatura alcanzará la habitación si el aparato permanece enchufado durante 10 minutos?

14 Un calentador de agua para la ducha tiene una potencia de 9,0 kW. Si el flujo de agua que lo atraviesa es de 15 kg de agua cada 3 minutos. ¿Cuál será la temperatura del agua de la ducha?

15 El fogón de una cocina de gas incrementa la temperatura de 500 g de agua desde 24 °C hasta 80 °C en 2 minutos exactos. ¿Cuál es la potencia media efectiva del fogón?

Intercambios de energía térmica

En la Figura 3.3 se muestra el gráfico temperatura-tiempo correspondiente a dos objetos a diferente temperatura situados en buen contacto término, de manera que la energía térmica se puede transferir relativamente rápido, suponiendo que el sistema está aislado de su entorno. En estas condiciones, *la energía térmica emitida por uno de los objetos es igual a la energía térmica absorbida por el otro*. Los intercambios de energía térmica pueden utilizarse como un medio alternativo para la determinación del calor específico, tal como se ilustra en la cuestión 16, o bien para la determinación de la energía que puede transferir un alimento o un combustible.

El término calorimetría se utiliza para describir experimentos en los que se intenta medir de forma precisa los cambios de temperatura debidos a diversos procesos físicos o químicos. Las transferencias de energía se pueden calcular si se conocen las masas y las capacidades caloríficas específicas. En las técnicas calorimétricas pueden ser necesarios unos aparatos, denominados *calorímetros*, diseñados de forma específica para limitar la transferencia de energía térmica desde el entorno o hacia este.

16 Se calienta un tornillo metálico grande de 53,6 g de masa durante bastante tiempo en un horno a 245 °C. Se transfiere el tornillo lo más rápidamente posible desde el horno a un vaso de precipitación que contiene 257,9 g de agua inicialmente a 23,1 °C (Figura 3.14). Se remueve continuamente el agua y la temperatura de esta aumenta hasta alcanzar un máximo de 26,5 °C.

a Calcula la energía transferida al agua.
b ¿Por qué se ha mantenido el tornillo en el horno durante bastante tiempo?
c ¿Por qué se ha realizado la transferencia de forma rápida?
d Calcula la capacidad calorífica específica del material del que está fabricado el tornillo.
e ¿Por qué ha sido necesario remover el agua?
f El valor calculado de la capacidad calorífica específica del tornillo, ¿corresponde a una infraestimación o a una sobreestimación del valor real? Razona la respuesta.

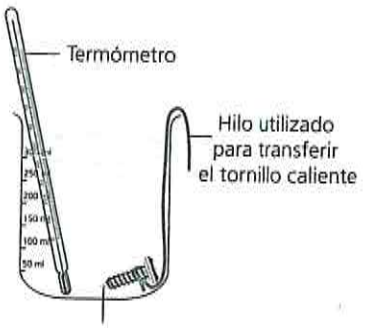


Figura 3.14 *Tornillo metálico caliente sumergido en agua fría*

17 Cuando se queman 14,5 g de un determinado combustible, se transfiere energía térmica a 63,9 g de agua. La temperatura del agua aumenta de 18,7 °C hasta 42,4 °C. Si suponemos que no hay transferencia de energía interna hacia el entorno, calcula la máxima cantidad de energía que puede transferirse a partir de 1 kg de dicho combustible. (Esto último se denomina *energía específica*).

18 Para llenar una bañera con agua, se añaden 84 kg de agua a 54 °C a 62 kg de agua a 17 °C.
a ¿Cuál es la temperatura final del agua?
b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta en el cálculo anterior?

19 Se añade arena a una temperatura inicial de 27,2 °C a una masa equivalente de agua a 15,3 °C. Si la capacidad calorífica específica de la arena es 822 $J kg^{-1} °C^{-1}$ y la capacidad calorífica específica del agua es 4 180 $J kg^{-1} °C^{-1}$, ¿cuál será la temperatura final de la mezcla? (Supón que no hay transferencia de energía con el entorno).

Capacidad térmica

Muchos objetos de uso cotidiano no están compuestos de una única sustancia, de modo que no tiene demasiado sentido referirse a una cantidad específica (un kilogramo) de dicho objeto. En estos casos se habla de **capacidad térmica** del objeto como un todo. Por ejemplo, nos puede interesar calcular la capacidad térmica de una habitación y su contenido con el objeto de escoger el aparato de calefacción o de aire acondicionado más apropiado.

La capacidad térmica de un objeto es la cantidad de energía necesaria para incrementar su temperatura 1 K. (Unidad: $J K^{-1}$ o $J °C^{-1}$).

$$\text{capacidad térmica, } C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Ejemplo resuelto

3 ¿Cuánta energía térmica se necesita para incrementar la temperatura de un hervidor y del agua que hay en su interior desde 23 °C hasta 27 °C si su capacidad térmica es 6 500 $J K^{-1}$?

$Q = C\Delta T$

$Q = 6\,500 \times (77 - 23)$

$Q = 3{,}51 \times 10^5 J$

Para las cuestiones siguientes, supón que no hay transferencia de energía hacia el entorno o desde este.

20 La capacidad térmica de una sartén y su contenido es $7000\,J\,K^{-1}$. ¿Cuánto tardará un calentador eléctrico de 1,5 kW en incrementar la temperatura de la sartén y su contenido desde 22 °C hasta 90 °C?

21 Si un calentador de 2,5 kW tardó 32 minutos en incrementar la temperatura de una habitación desde 8 °C hasta 22 °C, ¿cuál era la capacidad térmica de la habitación?

22 Si el contenido de un frigorífico con una potencia de enfriamiento de 405 W tiene una capacidad térmica de $23{,}9\,kJ\,K^{-1}$, ¿cuánto tardará en reducirse la temperatura media desde 19,50 °C hasta 5,20 °C?

Aplicaciones

Capacidad térmica y diseño de construcción

En países con clima seco y cálido, mantener el frescor durante el día puede ser un verdadero problema, especialmente si no se puede o no se desea utilizar aire acondicionado. Los habitantes de estos países conocen desde hace siglos las ventajas de construir hogares con paredes gruesas, es decir, con masas grandes y, por tanto, capacidades térmicas elevadas (Figura 3.15). En algunos climas, incluso, es frecuente que la temperatura del aire descienda de forma significativa durante la noche a causa de los niveles bajos de humedad y la falta de nubes, que favorecen la emisión de energía térmica.

■ **Figura 3.15** *Vivienda tradicional africana de paredes gruesas*

Durante el día, la energía térmica irradiada por el Sol calienta la construcción, de modo que el uso de grandes cantidades de materiales como la tierra y la piedra (que tienen capacidades caloríficas específicas relativamente altas) para la construcción de casas con capacidad térmica elevada, garantiza que el aumento de temperatura durante el día no sea demasiado brusco. Por la noche, por el mismo motivo, la temperatura de la construcción no caerá bruscamente, de manera que los habitantes se mantendrán calientes. Este efecto produce un agradable «retraso térmico», con temperaturas en el interior de la construcción «más frescas» por la mañana y «más cálidas» al final de la tarde o la noche.

En resumen, las construcciones con capacidad térmica elevada «compensan» las temperaturas extremas que, de otro modo, causarían las condiciones climáticas, así como los cambios significativos entre el día y la noche. Es una propiedad muy útil que presentan casi todas las construcciones, estén situadas en climas cálidos o fríos, ya que la mayoría se diseñan con el objeto de que tengan capacidades térmicas elevadas. Sin embargo, el coste económico que tiene el uso de grandes cantidades de materiales, por otra parte innecesarios, limita habitualmente el grosor de las construcciones.

1 **a** Efectúa una estimación de las diversas cantidades de materiales necesarios para construir una casa similar a la que se muestra en primer plano en la Figura 3.15 y calcula a continuación su capacidad térmica aproximada.

b Suponiendo que en un día cálido la energía térmica irradiada por el Sol llega perpendicularmente al tejado de un edificio a una tasa de $850\,W\,m^{-2}$, calcula el aumento máximo de temperatura producido durante 1 hora a mediodía. Supón que el 5% de la energía térmica se absorbe y se propaga de manera uniforme por todo el edificio. (Es decir, se ha hecho todo lo posible para garantizar que el edificio no absorba la energía radiante que incide sobre él, por ejemplo utilizando colores claros para reflejar la energía incidente).

c El aumento de temperatura calculado en el apartado *b* es, probablemente, mucho más elevado que el que ocurre en la realidad. Sugiere un motivo.

d Esboza un gráfico que represente, a tu modo de ver, la variación de la temperatura del aire de un país de clima cálido y seco a lo largo de un periodo de dos días y noches despejados. A continuación, añade al gráfico la representación de la variación de la temperatura del interior de un edificio construido de forma similar al de la Figura 3.15 durante el mismo periodo de tiempo.

e Sugiere un motivo por el cual la temperatura del aire se mide siempre en la sombra.

Naturaleza de la ciencia

La inevitable transferencia de energía mecánica en energía interna

Sabemos que, sin una fuerza que los impulse hacia delante, todos los objetos en movimiento tienden a decelerarse y acaban deteniéndose a causa de las fuerzas de fricción. A veces es necesario proporcionar fuerzas adicionales para detener un objeto en movimiento, como por ejemplo un coche. En este caso también se recurre habitualmente a las fuerzas de fricción. Cuando dichas fuerzas actúan para frenar el movimiento, la energía cinética ordenada macroscópicamente de las partículas en movimiento se transfiere a las energías cinéticas aleatorias y desordenadas de las partículas de ambas superficies. Se produce un aumento de la energía interna y de la temperatura. También se transfiere energía térmica al entorno.

La transferencia de energía ordenada a energía desordenada no se puede detener ni revertir. Si un objeto en movimiento se ha detenido a causa de la fricción, es simplemente imposible volver a transferir la energía interna aumentada (asociada a las energías cinéticas aleatorias de las moléculas) a la energía cinética ordenada macroscópica del objeto en movimiento. Por este motivo, podemos considerar que se ha «perdido» energía útil en el frenado por fricción.

Consideremos el caso de un coche que se detiene bajo la acción de sus frenos. La fricción entre los neumáticos y la carretera, así como la resistencia del aire sobre la superficie del coche, contribuyen a las fuerzas de resistencia, pero para simplificar podemos suponer que la totalidad de la energía cinética del coche se transfiere para aumentar la temperatura de los frenos (Figura 3.16). Se puede encontrar un ejemplo de este tipo de cálculo en la cuestión 23.

En la caída libre de un objeto se produce una transferencia de energía potencial gravitatoria en energía cinética. Si el objeto no rebota cuando impacta con el suelo, podemos asumir en un primer momento (para facilitar los cálculos) que la totalidad de la energía se transfiere en forma de energía interna del objeto. En otras palabras, no hay transferencia de energía hacia el suelo o hacia el entorno. Un ejemplo interesante es el del agua que cae por una cascada, para la que cabe esperar un aumento de temperatura muy pequeño (Figura 3.17).

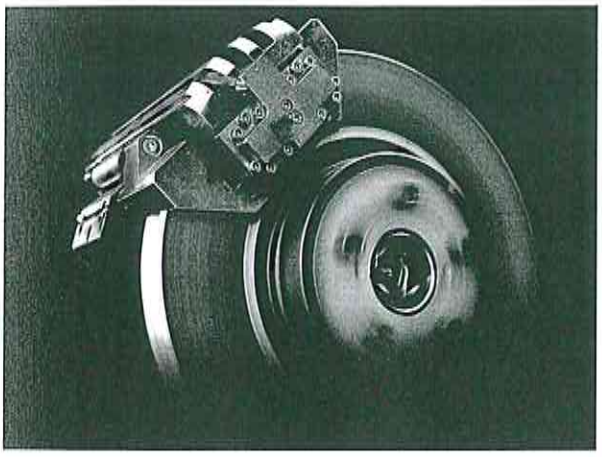


Figura 3.16 *Los discos de freno de un coche pueden calentarse mucho*

Figura 3.17 *La temperatura del agua que cae por una cascada es un poco más elevada en el extremo inferior que en el superior*

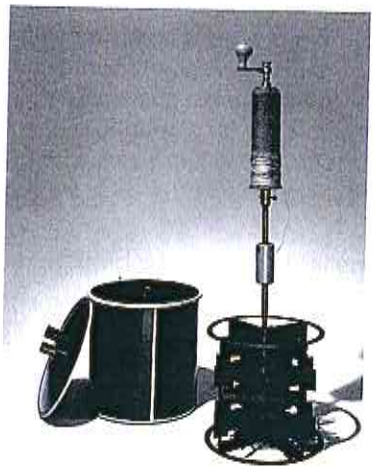
23 Un coche de masa total 1 200 kg y que se desplaza a 17,3 $m s^{-1}$ tiene cuatro discos de freno, cada uno con una masa de 424 g y capacidad calorífica específica 1 580 $J kg^{-1} °C^{-1}$.
- a Calcula la energía cinética del coche.
- b Estima el aumento máximo de temperatura de los frenos cuando se utilizan para decelerar el coche hasta su total detención.
- c El aumento real de temperatura es menor que el calculado en el apartado *b*, pero, ¿por qué sería mayor el aumento de temperatura si la deceleración fuera mayor?

24 Una bala con una masa de 12 g y que viaja a 670 $m s^{-1}$ (el doble de la velocidad del sonido) impacta sobre un bloque de madera de 650 g.
- a Estima el aumento de temperatura si la capacidad térmica combinada de la bala y del bloque es 1 880 $J K^{-1}$.
- b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?
- c Sin efectuar cálculos detallados, ¿qué aumento de temperatura se produciría con una bala similar a la del apartado *a* si viajara a la mitad de su velocidad?

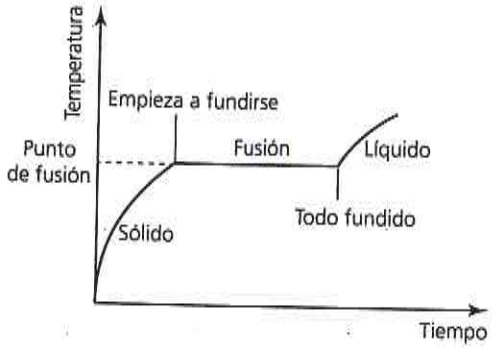
25 Mediante una fuerza constante de 160 N se hace girar una rueda de paletas en el interior de un tanque que contiene 8,00 kg de agua a 18,6 °C (Figura 3.18).
- a Si la fuerza de rotación ha producido un desplazamiento total de 250 m, ¿cuál ha sido el trabajo realizado?
- b Estima la temperatura final del agua.
- c ¿Por qué es difícil demostrar que la energía mecánica se puede transferir directamente en forma de una cantidad equivalente de energía interna?

26 Un trozo de plomo de 1 800 g de masa cae 14,8 m desde el tejado de un edificio.
- a Si la capacidad calorífica específica del plomo es 130 $J kg^{-1} °C^{-1}$ estima el aumento de temperatura del trozo de plomo tras su impacto con el suelo.
- b ¿Qué supuestos has tenido que asumir para realizar el cálculo anterior?
- c Explica por qué un trozo de plomo con el doble de masa que el anterior experimentaría aproximadamente el mismo aumento de temperatura si cayera desde la misma distancia.

27 La cola de caballo de las cataratas del Niágara tiene una altura de 53 m. ¿Cuál es el máximo aumento posible de temperatura del agua entre la parte superior y la parte inferior de esta catarata?



■ **Figura 3.18** *Aparato de Joule para convertir energía mecánica en energía interna.*



■ **Figura 3.19** *Cambios de temperatura cuando un sólido se calienta y se funde (nótese que las líneas se curvan solo a causa de la energía transferida al entorno)*

■ Cambio de fase

Una **fase** es una región del espacio en la que una sustancia tiene unas mismas propiedades físicas y químicas. Una sustancia concreta puede presentarse en fase sólida, fase líquida o fase gaseosa. A estas fases se las denomina a veces los tres *estados* de la materia. El agua, por ejemplo, puede presentarse en las tres fases (o estados): líquida, hielo (sólida) y vapor (gaseosa). Una botella que contiene aceite y agua contiene dos fases, ambas en estado líquido.

Cuando se transfiere energía térmica a un sólido normalmente este se calienta. Para muchas sustancias sólidas, una vez alcanzan una determinada temperatura comienzan a **fundirse** (pasan de sólidas a líquidas), y mientras se están fundiendo, su temperatura no cambia (Figura 3.19). Esta temperatura se denomina **punto de fusión** de la sustancia y tiene un valor fijo a una determinada presión atmosférica (Tabla 3.3). La **fusión** es un ejemplo de **cambio de fase**.

De la misma manera, cuando un líquido se enfría, su temperatura se mantiene constante en el punto de solidificación mientras cambia de fase de líquido a sólido (Figura 3.20). Este proceso se denomina solidificación o **congelación**. Este último término puede resultar confuso, ya que «sugiere» que el proceso de solidificación tiene lugar a una temperatura baja, pero esto no es necesariamente cierto (a menos que nos refiramos al agua que se está convirtiendo en hielo, por ejemplo).

Los cambios de fase del agua son tan habituales en nuestra vida diaria que tendemos a pensar que son ejemplos obvios pero, por descontado, muchas otras sustancias pueden fundirse y congelarse. Por ejemplo, el hierro fundido «se congela» a 1538 °C.

Figura 3.20 *La temperatura cambia cuando un líquido se enfría y se congela (solidifica)*

(En las gráficas de las Figuras 3.19 y 3.20 el *tiempo* aparece representado en el eje horizontal, pero la forma de la gráfica sería la misma si se reemplazara el tiempo por la *energía transferida* [suponiendo que la tasa de calentamiento o de enfriamiento, respectivamente, sea constante]).

También se produce un cambio de fase cuando un líquido se convierte en gas o cuando un gas se convierte en líquido. El cambio de fase de gas a líquido puede tener lugar mediante ebullición o evaporación, pero generalmente este proceso se denomina **vaporización**. El cambio de gas a líquido se denomina **condensación**. La temperatura a la que se produce la ebullición se denomina **punto de ebullición** de la sustancia, y tiene un valor fijo para una determinada presión atmosférica (véase Tabla 3.3). Los puntos de ebullición pueden variar de forma significativa según las distintas presiones atmosféricas del entorno.

La representación gráfica del cambio de temperatura de un líquido que está siendo calentado hasta su ebullición tiene una forma análoga a la de la fusión de un sólido (Figura 3.19), mientras que la representación gráfica de un gas que está siendo enfriado tiene una forma análoga a la de un líquido congelándose (Figura 3.20).

Tanto para fundir un sólido como para vaporizar un líquido hace falta transferir energía térmica. Sin embargo, como ya hemos visto, la fusión y la vaporización se producen a temperatura constante, de manera que la energía suministrada debe invertirse en vencer las fuerzas intermoleculares e incrementar las separaciones moleculares. En el caso de la fusión se vencen algunas de estas fuerzas, pero en el caso de la vaporización se vencen *todas ellas*.

Cuando un líquido se congela (se solidifica) se emite la misma cantidad de energía por kilogramo que se necesita para fundirlo (sin cambio de temperatura). Análogamente, la vaporización y la condensación llevan asociadas cantidades iguales de energía transferida.

En la Figura 3.21 se representan los cuatro cambios de fase principales. En la Tabla 3.3 se enumeran los puntos de fusión y de ebullición de algunas sustancias comunes.

Figura 3.21 *Cambios de fase*

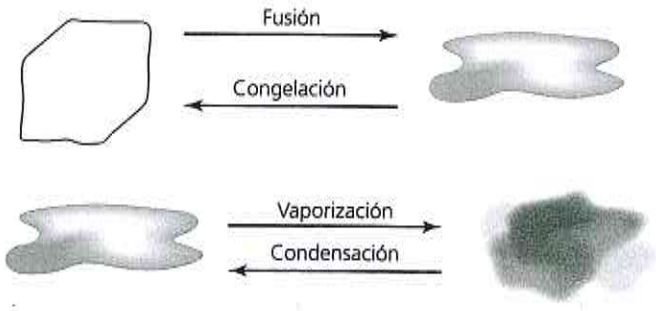
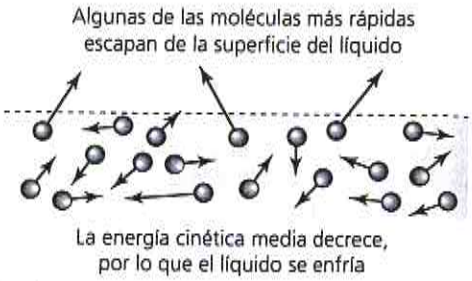


Tabla 3.3 *Puntos de fusión y de ebullición de algunas sustancias (a presión atmosférica normal)*

Sustancia	Punto de fusión		Punto de ebullición	
	°C	K	°C	K
agua	0	273	100	373
mercurio	−39	234	357	630
alcohol (etanol)	−117	156	78	351
oxígeno	−219	54	−183	90
cobre	1083	1356	2580	2853
hierro	1538	1811	2750	3023

Evaporación y ebullición

Las moléculas de un líquido poseen distintos valores de energía cinética que se transfieren unas a otras de forma continua. Esto significa que siempre hay algunas moléculas cerca de la superficie que poseen suficiente energía para vencer las fuerzas de atracción que mantienen unidas a las moléculas del líquido.



■ **Figura 3.22** *Las moléculas salen de la superficie durante la evaporación*

Estas moléculas pueden escapar de la superficie del líquido, y a este efecto macroscópico se le denomina **evaporación**. La pérdida de las moléculas más energéticas tiene como consecuencia que la energía cinética media de las moléculas que permanecen en el líquido decrece (hasta que entra energía térmica procedente del entorno). Este efecto microscópico explica el descenso macroscópico de la temperatura (enfriamiento) que siempre acompaña a la evaporación de un líquido.

La evaporación se produce únicamente a partir de la superficie de un líquido y puede darse a cualquier temperatura, aunque la tasa de evaporación aumenta de forma significativa cuando aumenta la temperatura (entre los puntos de fusión y de ebullición). La **ebullición** tiene lugar a una temperatura determinada, la temperatura a la que las moléculas tienen suficiente energía cinética para formar burbujas en el interior del líquido.

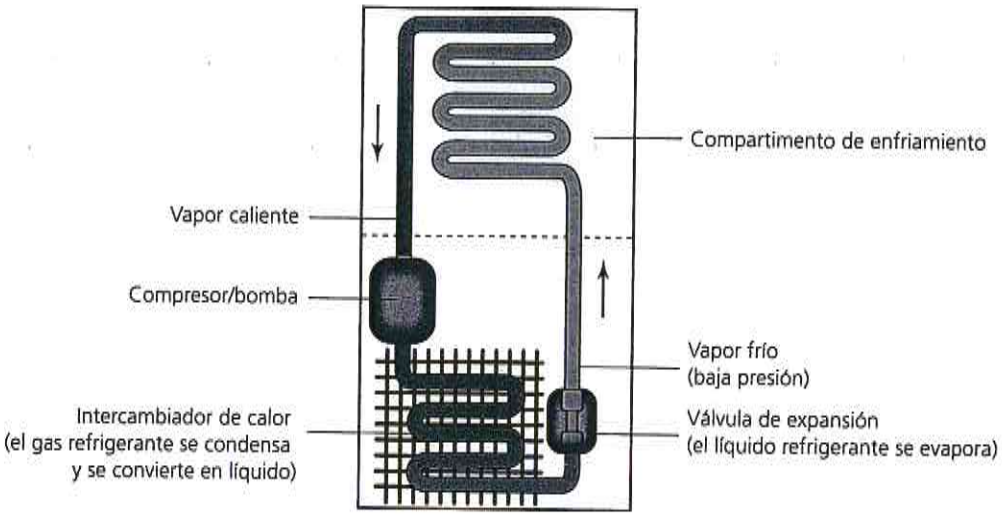
Aplicaciones

Evaporación, enfriamiento y refrigeración

El efecto de enfriamiento producido por la evaporación del agua ha sido utilizado durante miles de años para mantener frescas tanto las viviendas como sus habitantes. Por ejemplo, en Asia central, las torres abiertas de las construcciones favorecían el flujo de aire sobre depósitos abiertos de agua, incrementándose de este modo la tasa de evaporación y la transferencia de energía térmica hacia la parte superior de la torre mediante *corrientes de convección*. El flujo de aire alrededor de las personas en los edificios favorece asimismo el proceso de enfriamiento natural del cuerpo humano mediante el sudor.

Los modernos aparatos de refrigeración y aire acondicionado también se basan en el enfriamiento producido cuando un líquido se evapora. El líquido o gas utilizado se denomina *refrigerante*. En el mejor de los casos se necesita una gran cantidad de energía térmica para que el refrigerante pase de ser un líquido a un gas denso a una temperatura ligeramente inferior a la deseada.

En un frigorífico, por ejemplo, el líquido refrigerante absorbe energía térmica del compartimento de alimentos y se transforma en un gas más caliente. Para que este gas pueda ser reutilizado y convertido de nuevo en un líquido más frío, tiene que ser sometido a una compresión y una reducción de temperatura. El proceso se facilita transfiriendo energía térmica desde el gas refrigerante caliente hacia el exterior del frigorífico. (Figura 3.23).



■ **Figura 3.23** *Diagrama esquemático de un frigorífico*

Además de poseer las propiedades térmicas adecuadas, un refrigerante no debe ser tóxico ni perjudicial para el medio ambiente. El motivo es que, al cabo de un determinado periodo de tiempo, pueden producirse fugas de refrigerante hacia el medio ambiente. En la década de 1980 se descubrió que los refrigerantes más ampliamente utilizados (los CFC) eran perjudiciales para el medio ambiente (para la capa de ozono en particular), de modo que en muchos países se recomendó su no utilización e incluso llegó a prohibirse. Más recientemente la preocupación se ha focalizado en el efecto de los refrigerantes sobre el calentamiento global. Se ha investigado exhaustivamente la producción de diversos refrigerantes sintéticos con la combinación apropiada de propiedades físicas y químicas.

1 Dibuja esquemáticamente una construcción de la antigua Asia central en la que aparezcan la torre, el depósito de agua y las corrientes de convección.

2 El agua es barata, no es tóxica ni para los seres humanos ni para el medio ambiente y requiere una gran cantidad de energía para evaporarse. ¿Por qué no se usa entonces de forma generalizada como refrigerante en los aparatos de aire acondicionado?

3 Discute razonadamente si una fuente situada en la sala de estar de la vivienda contribuye o no a mantenernos frescos en un día de mucho calor.

4 Como se explicó anteriormente, hay que quitar energía térmica del refrigerante durante su ciclo. Sugiere un sistema para hacerlo.

Calor latente específico

Consideremos las transferencias de energía asociadas a los cambios de fase. Como ejemplo, en la Figura 3.24 se representan los cambios de temperatura que pueden tener lugar cuando una cierta cantidad de hielo picado se calienta *de forma continua* (primero para convertirlo en agua y después en vapor cuando el agua hierve). Aparecen dos mesetas en el gráfico. La primera, correspondiente a 0 °C (punto de fusión del agua), muestra la utilización de la entrada de energía adicional procedente del calentador para vencer algunas fuerzas intermoleculares del hielo. La temperatura no comienza a aumentar hasta que la totalidad del agua está en fase líquida. La segunda meseta corresponde a la temperatura de 100 °C, el punto de ebullición del agua. En este caso la energía suministrada se utiliza para liberar a todas las moléculas de las fuerzas intermoleculares.

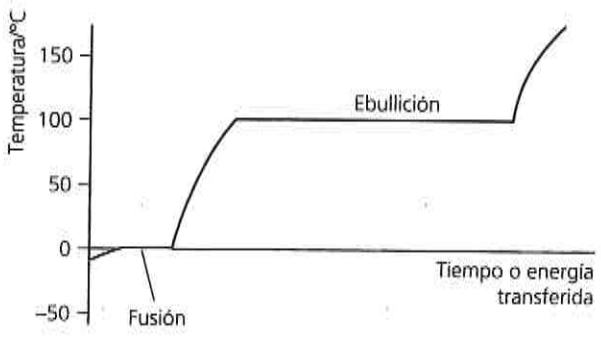


Figura 3.24 *Representación gráfica de la temperatura en función del tiempo para el calentamiento de hielo picado*

La energía térmica asociada a los cambios en las energías potenciales durante un cambio de fase cualquiera se denomina **calor latente** («latente» significa «escondido»). Durante la fusión o la ebullición debe transferirse calor latente a la sustancia. Durante la condensación o la congelación, el calor latente es transferido *desde* la sustancia.

El calor latente asociado a la fusión o a la congelación se denomina **calor latente de fusión**, L_f. El calor latente asociado a la ebullición o a la condensación se denomina **calor latente de vaporización**, L_v.

El **calor específico latente** de una sustancia, L, es la cantidad de energía transferida cuando 1 kilogramo de la sustancia cambia de fase a *temperatura constante*. (Las unidades son $J kg^{-1}$.)

Es decir:

$$\text{calor específico latente, } L = \frac{\text{energía térmica transferida}}{\text{masa}} = \frac{Q}{m}$$

lo que se escribe de forma habitual como:

$$Q = mL$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Por ejemplo, el calor latente específico de fusión del plomo es $2{,}45 \times 10^4 J kg^{-1}$ y su punto de fusión es 327 °C. Esto significa que se necesitan $2{,}45 \times 10^4$ J para fundir 1 kg de plomo a una temperatura constante de 327 °C.

Los experimentos para la determinación del calor específico latente (se suele utilizar el agua como ejemplo práctico) presentan mucha similitud con los experimentos para la determinación de la capacidad calorífica específica. Para fundir o para hervir una sustancia habitualmente se utiliza un calentador eléctrico de capacidad conocida (o bien un líquido más caliente para fundir un sólido más frío). En la cuestión 31 se describe un experimento de este tipo.

Ejemplo resuelto

4 Los calores latentes de vaporización del agua y del etanol son, respectivamente, $2{,}27 \times 10^6 J kg^{-1}$ y $8{,}55 \times 10^5 J kg^{-1}$.

a ¿Cuál de ellos es más «fácil» de convertir en gas/hervir (a la misma presión)?

b ¿Cuánta energía térmica se necesita para convertir 50 g de etanol en un gas a su punto de ebullición de 78,3 °C?

a Es más «fácil» hervir etanol porque se necesita mucha menos energía para convertir cada kilogramo en gas.

b $Q = mL$

$Q = 0{,}050 \times (8{,}55 \times 10^5)$

$Q = 4{,}3 \times 10^4$ J

---

28 Si el calor latente de fusión de un determinado tipo de chocolate es $160\,000 J kg^{-1}$, ¿cuánta energía térmica te quitan cuando se funde una tableta de 10 g de chocolate en tu boca?

29 Se calienta agua con un hervidor de 2 250 W. Cuando llega a los 100 °C hierve y durante los siguientes 180 s la masa de agua se reduce desde 987 g hasta 829 g. Utiliza estos datos para estimar el calor latente de vaporización del agua.

30 ¿Por qué cabe esperar que el calor latente de vaporización de una sustancia sea habitualmente mayor que el calor latente de fusión?

31 0,53 g de vapor a 100 °C se condensan sobre un objeto y a continuación el agua se enfría rápidamente hasta 35 °C.

a ¿Cuánta energía térmica se transfiere desde el vapor?:

i cuando se condensa

ii cuando se enfría el agua

b ¿Por qué una quemadura producida por vapor es mucho más peligrosa que una producida por agua a la misma temperatura (100 °C)? Sugiere una respuesta.

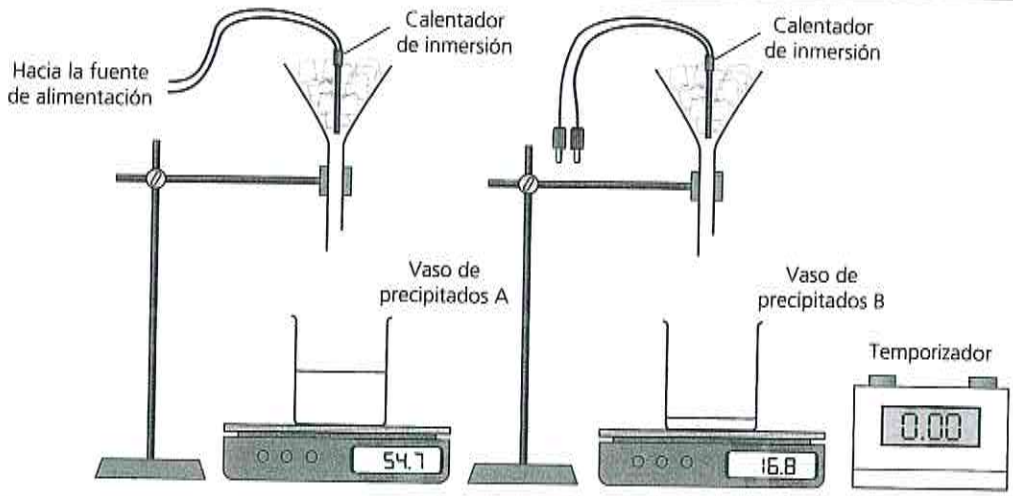
32 En el experimento que se muestra en la Figura 3.25, se colocan dos calentadores por inmersión de 50 W en dos embudos distintos. El calentador situado sobre el vaso de precipitados A se conecta a la red, pero el que está sobre el vaso de precipitados B se mantiene desconectado. Al cabo de 5 minutos se detecta que la masa de hielo fundido en el vaso de precipitación A es de 54,7 g, mientras que la masa correspondiente al vaso B es de 16,8 g.

a ¿Por qué motivo se coloca el hielo en dos embudos distintos?

b Utiliza los datos anteriores para estimar el calor latente de fusión del hielo.

c Sugiere un motivo por el que este experimento no proporciona un resultado exacto.

d Describe un posible cambio en el experimento que mejore su exactitud.



■ **Figura 3.25** *Experimento para la determinación del calor latente de fusión del hielo*

33 Se colocan 120 g de agua a 23,5 °C en una bandeja de plástico para hacer cubitos de hielo. Si la bandeja ya está a 0 °C, calcula cuánta energía térmica hay que quitarle al agua para convertirla en hielo a 0 °C. (El calor latente de fusión del agua es $3{,}35 \times 10^5\,J\,kg^{-1}$).

34 Las nubes están formadas por gotas de agua condensada que a veces se congelan, convirtiéndose en partículas de hielo. Supongamos que una nube tiene una masa de 240 000 kg, ¿cuánta energía térmica emitiría si la totalidad de la nube se convirtiera en hielo a 0 °C?

35 Una determinada cantidad de agua y un recipiente de cristal se encuentran a una temperatura de 23 °C y poseen una capacidad térmica combinada de $1\,500\,J\,K^{-1}$. Si se introduce en el agua un cubito de hielo de 48 g a –8,5 °C y se remueve hasta que se haya fundido el hielo, ¿cuál será la temperatura final? (La capacidad calorífica específica del hielo es $2\,100\,J\,kg^{-1}\,K^{-1}$. El calor latente de fusión del agua es $3{,}35 \times 10^5\,J\,kg^{-1}$).

3.2 Modelización de un gas

Las propiedades de los gases ideales permiten a los científicos establecer predicciones sobre el comportamiento de los gases reales

La **termodinámica** es una parte de la física que estudia las transferencias de energía térmica para la realización de un trabajo útil. Normalmente estos procesos están relacionados con gases a altas temperaturas. Para comprender los conceptos de la termodinámica es necesario tener un buen conocimiento de algunos de los conceptos científicos más básicos, como el comportamiento de las moléculas, la energía, la temperatura y la presión. Estos conceptos se utilizan en todas las disciplinas científicas.

■ Modelo cinético de un gas ideal

Comenzaremos nuestro estudio introductorio de la termodinámica a partir de un modelo simplificado que explique cómo se mueven las moléculas de un gas.

De las tres fases de la materia, la fase gaseosa es la más fácil de estudiar, porque normalmente podemos asumir que los movimientos de las moléculas de un gas son aleatorios e independientes entre sí. El comportamiento microscópico aleatorio de miles de millones de moléculas individuales, tiene como resultado un comportamiento macroscópico de los gases totalmente predecible y mucho más fácil de entender que las interacciones moleculares en el caso de los sólidos y los líquidos, mucho más complejas.

Podemos comenzar estableciendo algunos supuestos que permiten simplificar el comportamiento de las moléculas de un gas. A esta teoría se la denomina **modelo cinético de un gas ideal**. El término «cinético» se utiliza porque la teoría se aplica a moléculas *en movimiento*. Este modelo se puede utilizar, por tanto, para explicar la presión, la temperatura y el comportamiento macroscópico de los gases reales. Hay que tener en cuenta ya desde un buen principio que este modelo teórico describe de manera adecuada las propiedades de los gases reales en la mayoría de circunstancias, aunque no en todas.

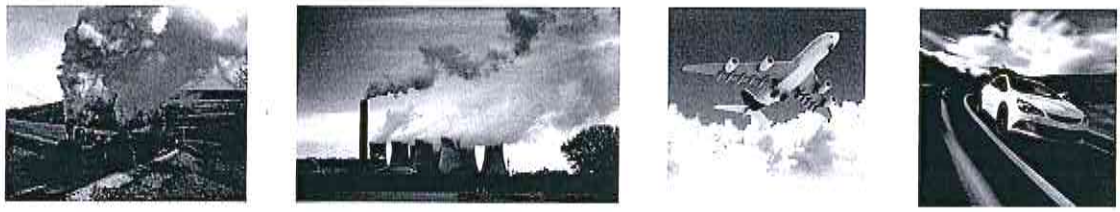
Naturaleza de la ciencia

Utilización de gases a alta temperatura

La invención de aparatos que pudieran utilizar de forma continua la energía térmica (calor) transferida desde un combustible ardiendo para efectuar un trabajo mecánico útil cambió el mundo por completo. Ya no era necesario que ese duro trabajo lo efectuaran personas o animales, puesto que se podían diseñar máquinas que lo hicieran en su lugar y, además, de forma mucho más rápida.

La idea de quemar un combustible para calentar agua con el objeto de obtener vapor que, a su vez, podría utilizarse para mover algo era una idea que se venía perfilando desde hacía mucho tiempo. Llevarla a la práctica, sin embargo, planteaba muchas más dificultades y no fue hasta principios del siglo XVIII cuando se fabricaron las primeras máquinas de vapor para su posterior comercialización. Hubo de pasar un siglo hasta que George Stephenson construyera su *Locomotion*, la locomotora de vapor para la primera línea ferroviaria pública, inaugurada en Reino Unido en 1825.

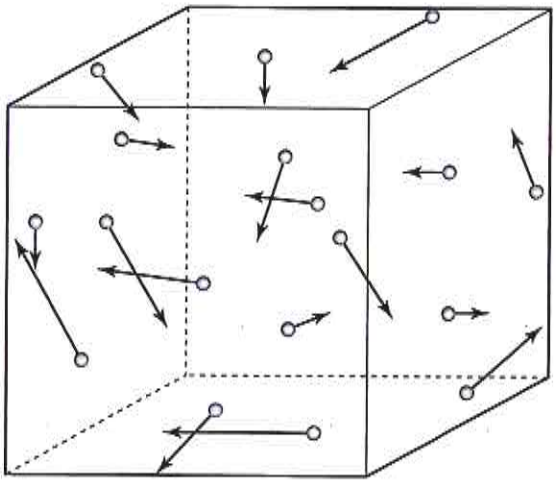
Casi 200 años después, las cosas son muy distintas. Vivimos en un mundo dominado por los **motores térmicos** (aparatos que obtienen trabajo mecánico útil a partir del flujo de energía térmica). Estamos rodeados por motores de todas clases: en coches, barcos, trenes, aviones, fábricas y centrales eléctricas donde se produce electricidad (véase Figura 3.26). Todos ellos requieren una transferencia de energía térmica procedente del combustible para funcionar. Es difícil no exagerar la importancia de estos aparatos en la vida moderna, ya que sin ellos nuestras vidas serían muy distintas. Por otro lado, también somos muy conscientes de los problemas asociados al uso de los motores térmicos: limitación de los recursos de combustibles de origen fósil, aparatos ineficientes, contaminación y calentamiento global.



■ **Figura 3.26** *Utilización de gases a alta temperatura en motores térmicos*

Supuestos del modelo cinético para un gas ideal

El modelo microscópico de un gas consiste en un gran número de moléculas que se mueven aleatoriamente. Podemos imaginarlas como las «moléculas en una caja», como se representa en la Figura 3.27. Las flechas de diferentes longitudes representan las velocidades aleatorias. Existen muchas simulaciones por ordenador del comportamiento de un gas en las que se representa el movimiento de las partículas durante un periodo de tiempo. Es muy recomendable acceder a una de estas simulaciones.



■ **Figura 3.27** *Moléculas de gas moviéndose aleatoriamente en el interior de un recipiente*

Para simplificar la teoría se admiten los supuestos siguientes, de manera que el gas puede describirse como «ideal»:

- El gas contiene *un número muy elevado de moléculas idénticas.*
- El *volumen de las moléculas es despreciable* en comparación con el volumen total ocupado por el gas.
- Las moléculas *se desplazan en direcciones completamente aleatorias* y a velocidades muy variables.
- *No hay fuerzas de interacción entre las moléculas, excepto cuando colisionan.* Como consecuencia, las moléculas no tienen energía potencial (eléctrica). Bajo este supuesto, asumimos que cualquier cambio en la energía interna de un gas ideal ocasiona únicamente un cambio en la energía cinética aleatoria.
- *Todas las colisiones son elásticas*; es decir, la energía cinética total de las moléculas permanece constante a la misma temperatura. Esto último significa que no hay transferencia de energía desde el gas a su entorno y que la velocidad aleatoria media de sus moléculas no decrece. ¡Si no fuera así, todos los gases se enfriarían y sus moléculas se precipitarían al fondo de los recipientes y se condensarían, convirtiéndose en líquidos!

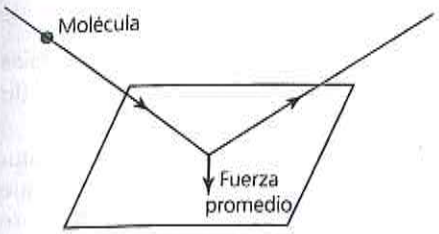


Figura 3.28
Cada colisión molecular con una pared ocasiona una diminuta fuerza sobre esta

Utilización de la teoría cinética de un gas ideal para explicar la presión de un gas

Cuando una molécula impacta (colisiona) con la pared de un recipiente, ejerce una fuerza sobre sus paredes (Figura 3.28).

Podemos calcular la intensidad de la fuerza conociendo la masa y el cambio en el momento de la molécula, además de la duración del impacto (véase Capítulo 2). Cada una de las colisiones puede dar lugar a una fuerza de distinta intensidad, de modo que no es realista pretender calcular todas y cada una de las fuerzas que las moléculas individuales ejercen sobre las paredes. No obstante, dado que los movimientos de las moléculas son aleatorios y que existe un número extraordinariamente elevado de moléculas, la fuerza total producida por multitud de colisiones moleculares sobre una unidad de superficie del recipiente es completamente predecible y normalmente será constante en todas las zonas del recipiente. A esta fuerza por unidad de superficie se la denomina **presión** del gas. Para representarla se utilizan indistintamente los símbolos P y p.

Las colisiones entre las moléculas (colisiones intermoleculares) tienen lugar constantemente, pero su consecuencia es simplemente un cambio aleatorio en las velocidades moleculares y no tienen efecto global sobre la presión u otras propiedades macroscópicas del gas.

Presión

El efecto de una fuerza suele depender del área de la superficie sobre la que actúa. Por ejemplo, cuando el peso de un sólido presiona sobre una determinada superficie, las consecuencias normalmente dependen del área afectada, así como de la intensidad de la fuerza.

La presión se define como fuerza por unidad de área:

$$p = \frac{F}{A}$$

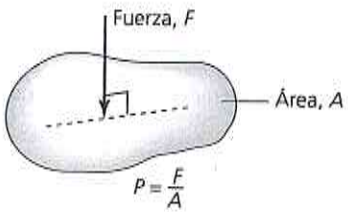


Figura 3.29
Definición de la presión

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. La unidad del SI para la presión es el pascal Pa. $1\,Pa = 1\,N\,m^{-2}$.

Observemos que la fuerza que se utiliza para calcular la presión es perpendicular a la superficie, tal como se muestra en la Figura 3.29. Es decir, se trata de una fuerza **normal**.

La presión que se produce en un gas, debida a las colisiones moleculares aleatorias, actúa de forma equivalente en todas las direcciones y tiene un valor habitual del orden de magnitud de 10 N sobre cada centímetro cuadrado. En las unidades del SI, la presión habitual del aire que nos rodea (**presión atmosférica**) es $1{,}0 \times 10^5$ Pa a nivel del mar. La presión atmosférica actúa hacia arriba y hacia los laterales, además de hacia abajo.

Utilización de la teoría cinética de los gases ideales para explicar la temperatura de un gas

Al principio de este capítulo, explicamos la temperatura como una manera de determinar la dirección de la transferencia de energía térmica. Ahora podemos interpretar la temperatura de una manera más profunda: en términos de energías moleculares. Cuando calentamos un gas, la velocidad media de sus moléculas aumenta. La energía térmica transferida hacia el gas incrementa la energía cinética aleatoria de las moléculas.

Cuando una sustancia se enfría, sus moléculas se mueven más lentamente. Al final, casi todo el movimiento molecular se detiene y no es posible alcanzar una temperatura más baja. Los experimentos con gases predicen que esto último ocurre a −273,15 °C, una temperatura que, como vimos anteriormente, se denomina *cero absoluto*.

La **temperatura absoluta** (T) de un gas ideal (en kelvin) es una medida de la energía cinética de traslación aleatoria media de sus moléculas ($\overline{E}_C$).

La barra sobre la E indica que se está utilizando un valor promedio.

Esta importante relación puede expresarse matemáticamente como:

$$\overline{E}_C = \frac{3}{2} k_B T$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física.*

k_B es una constante importante que relaciona la temperatura macroscópica con las energías microscópicas. Se denomina **constante de Boltzmann** y su valor numérico es $1{,}38 \times 10^{-23}\,J\,K^{-1}$ (figura en el *Apéndice de datos de Física*).

Aunque estamos hablando de gases *ideales*, esta ecuación y la interpretación de la temperatura pueden aplicarse también a los gases reales. Observemos que no hay nada en la ecuación que se aplique a un gas en particular. En otras palabras, a una misma temperatura, las moléculas de *todos* los gases tienen la misma energía cinética de *traslación* media. Si consideramos que la energía cinética se expresa mediante $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, podemos ver que las moléculas de los distintos gases deben tener distintas velocidades medias a una misma temperatura: las moléculas más masivas se mueven más despacio.

k_B puede ser interpretada en términos de la capacidad calorífica específica de un gas: corresponde a $\frac{2}{3}$ de la cantidad de energía media que debe suministrarse por molécula para incrementar en 1 K la temperatura de un gas ideal *monoatómico*. Debemos tener en cuenta, sin embargo, que se necesita más energía para cambiar la temperatura de los gases *moleculares* porque también se ven involucradas las energías cinéticas de rotación y de vibración.

36 La presión atmosférica normal es aproximadamente 1×10^5 Pa.
- **a** ¿Cuál es la fuerza total que actúa sobre un superficie de 1 mm^2?
- **b** Si un estudiante tuviera un cuerpo con una superficie total de 1,5 m^2, ¿cuál sería la fuerza total que actúa sobre su piel?
- **c** ¿Cómo es que no notamos una fuerza de tal magnitud?

37 ¿Por qué aumenta la presión debajo del agua a medida que un submarinista se sumerge a mayor profundidad?

38 **a** La presión bajo nuestros pies actúa en dirección hacia el suelo, pero la presión en un gas actúa en todas direcciones. Explica este fenómeno.
- **b** ¿En qué dirección o direcciones actúa la presión en un líquido?

39 **a** Calcula la energía cinética de traslación media de las moléculas del aire a 27 °C.
- **b** Calcula la temperatura (°C) a la que la energía cinética de traslación media de las moléculas de un gas es $1{,}0 \times 10^{-20}$ J.
- **c** Estima la energía cinética de traslación media de las partículas de la superficie del Sol. (Utiliza Internet para obtener los datos necesarios).

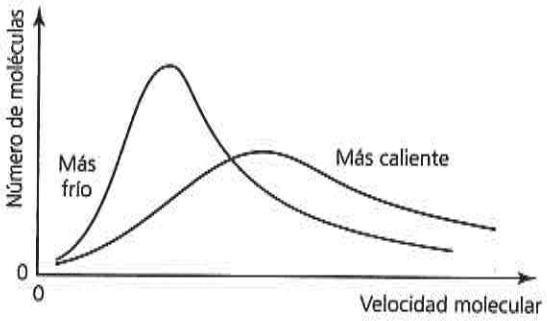
40 **a** Determina un valor para la velocidad media de las moléculas de oxígeno a 0 °C (la masa de una molécula de oxígeno es = $5{,}32 \times 10^{-26}$ kg).
- **b** Determina un valor para la velocidad media de las moléculas de nitrógeno a la misma temperatura (la masa de una molécula de nitrógeno es = $4{,}65 \times 10^{-26}$ kg).

Es importante destacar que las moléculas individuales de un mismo gas a una misma temperatura se mueven siguiendo un amplio intervalo de velocidades y energías cinéticas. Cualquier valor calculado es solamente un promedio. La temperatura es un concepto que solo puede aplicarse a un conjunto muy numeroso de moléculas, no a moléculas individuales. Es decir, la temperatura es un concepto macroscópico, aunque desde el punto de vista estadístico tiene una interpretación microscópica.

Perspectivas adicionales

Teoría cinética y distribución de velocidades moleculares

En la Figura 3.30 se representa el intervalo de velocidades moleculares y su distribución para un gas típico, así como los cambios que se producen en estos valores a medida que aumenta la temperatura. Esta distribución se conoce con el nombre de *distribución de Maxwell-Boltzmann.*



■ Figura 3.30 *Distribuciones típicas de las velocidades moleculares en un gas*

Cabe destacar que no hay moléculas con velocidad cero y muy pocas con velocidades elevadas. Las velocidades y direcciones moleculares cambian continuamente a consecuencia de las colisiones intermoleculares. Como ya hemos visto, mayor temperatura significa mayor energía cinética y, por tanto, mayor velocidad molecular. El intervalo de velocidades también se amplía y el máximo desciende, manteniéndose la misma área bajo la gráfica, ya que esta área representa el número de moléculas, que es constante.

La Figura 3.31 ilustra los intervalos de velocidades moleculares para distintos gases a la misma temperatura. Puede verse que, como explicamos anteriormente, a la misma temperatura las moléculas de menos masa tienen velocidades más elevadas que las moléculas de más masa.

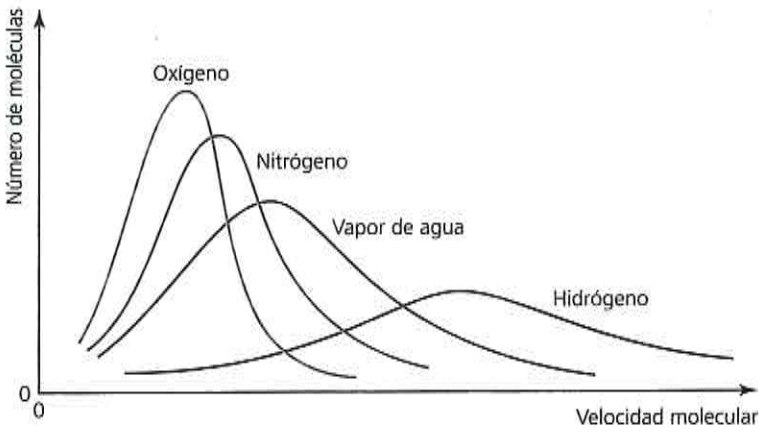


Figura 3.31 *Distribución de las velocidades moleculares de distintos gases a la misma temperatura*

1 **a** Explica por qué el hidrógeno en forma gaseosa *difunde* más rápidamente que otros gases a la misma temperatura.

b Sugiere el nombre de un gas que se difunda muy lentamente.

c Si colocamos un cilindro con gas nitrógeno a 20 °C en un avión en un aeropuerto y después el avión viaja a 500 $m\,s^{-1}$, ¿qué les ocurrirá a la velocidad media y a la temperatura de las moléculas de nitrógeno? Razona tu respuesta.

d Razona por qué la voz de una persona suena con un tono inusualmente agudo cuando acaba de inhalar una pequeña cantidad de gas helio procedente de un globo.

e Explica por qué sería razonable asumir que los volúmenes de los cuatro gases representados en la Figura 3.31 son aproximadamente iguales.

Mol, masa molar y número de Avogadro

Si queremos efectuar cálculos relativos a la masa, la velocidad y la energía cinética de las moléculas de un gas, necesitamos comprender la relación entre la medida macroscópica de la masa y el número microscópico de moléculas.

La *cantidad* de una sustancia (símbolo *n*) es una medida del número de partículas que contiene y se mide en moles:

Un **mol** de una sustancia es la cantidad de sustancia que contiene tantas partículas (definitorias de la sustancia) como átomos contienen exactamente 12 g de carbono-12.

El número de partículas que hay en un mol se denomina **número de Avogadro**, N_A.

El valor del número de Avogadro figura en el *Apéndice de datos de Física*: $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\,mol^{-1}$ (con tres cifras significativas). Así, para una muestra que contenga *N* moléculas, el número de moles viene dado por:

$$n = \frac{N}{N_A}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

El valor del número de Avogadro puede determinarse experimentalmente a partir del estudio de la transmisión de las corrientes eléctricas (véase Capítulo 5) por parte de los iones en movimiento durante la **electrolisis** y de medidas precisas de los cambios de masa asociados.

Por definición, 1 mol de átomos de carbono-12 tiene una masa de exactamente 12 g y contiene $6{,}02 \times 10^{23}$ átomos. El mismo número de átomos de hidrógeno tendría una masa de solo 1,0 g, porque cada átomo de hidrógeno tiene solo $\frac{1}{12}$ de la masa de un átomo de carbono-12. Análogamente, 63,5 g de cobre contendrían el mismo número de átomos, ya que, en promedio, cada átomo de cobre tiene 63,5 veces más masa que un átomo de hidrógeno.

■ **Figura 3.32** *Un mol de agua (en forma de hielo), azúcar, cobre y aluminio*

La mayoría de sustancias son moleculares y cada molécula está compuesta de dos o más átomos. Un mol de una sustancia molecular contiene el número de Avogadro de *moléculas*. Por ejemplo, 1 mol de *átomos* de oxígeno tiene una masa de 16 g, pero el oxígeno es una molécula que tiene dos átomos, O_2, por tanto, 1 mol de *moléculas* de oxígeno ($6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas) tiene una masa de 32 g. La masa molar del oxígeno es $32\,g\,mol^{-1}$.

La **masa molar** de una sustancia se define como la masa que contiene 1 mol de partículas (definitorias) (unidad: $g\,mol^{-1}$).

En la Tabla 3.4 se enumeran las masas molares de algunas sustancias corrientes, así como el número de partículas asociadas. En la Figura 3.32 se representa el aspecto que tendría 1 mol de distintas sustancias.

■ **Tabla 3.4** *Masas molares*

Sustancia	Masa molar/g mol^{-1}	Partículas
aluminio	27,0	$6{,}02 \times 10^{23}$ átomos de aluminio
cobre	63,5	$6{,}02 \times 10^{23}$ átomos de cobre
oro	197	$6{,}02 \times 10^{23}$ átomos de oro
hidrógeno	2,02	$12{,}04 \times 10^{23}$ átomos de oxígeno combinados para formar $6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas
oxígeno	32,0	$12{,}04 \times 10^{23}$ átomos de oxígeno combinados para formar $6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas
agua	18,0	$6{,}02 \times 10^{23}$ átomos de oxígeno combinados con $12{,}04 \times 10^{23}$ átomos de hidrógeno para formar $6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas de agua
aire (a presión y temperatura normales)	≈29	$6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas de una mezcla de gases
azúcar (sacarosa)	342	$6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas de gran tamaño

Ejemplo resuelto

5 La masa molar del agua es 18 g mol^{-1}. ¿Cuántas moléculas hay en 1 kg de agua?

número de moles (cantidad de agua) en 1 kg = $\frac{1000}{18} = 55{,}6$ moles

número de moléculas en 55,6 moles = $55{,}6 \times (6{,}02 \times 10^{23}) = 3{,}34 \times 10^{25}$ moléculas

Para responder a las cuestiones siguientes es necesario utilizar datos de la Tabla 3.4.

41 **a** ¿Qué masa de aluminio contendrá exactamente 4 moles de átomos?
b ¿Qué masa de sacarosa contendrá $1{,}0 \times 10^{22}$ moléculas?
c ¿Cuántos moles hay en 2,00 kg de carbono?
d ¿Cuántas moléculas hay en 1,0 kg de dióxido de carbono (CO_2)?

42 Un anillo de oro tenía una masa de 12,3 g.
- **a** ¿Cuántos moles de átomos de oro contenía?
- **b** Cuando se pesa al cabo de 50 años, su masa ha decrecido hasta 12,2 g. ¿Cuántos átomos de oro se «han perdido» en promedio cada segundo durante este periodo de tiempo?

43 **a** Si la densidad del aire de un aula es $1{,}3\,kg\,m^{-3}$, ¿cuál es la masa total de gas de una habitación de dimensiones 2,5 m x 5,0 m x 10,0 m?
- **b** ¿Cuántos moles de aire hay aproximadamente en la habitación?
- **c** ¿Cuántas moléculas de aire hay aproximadamente en la habitación?

44 La densidad del aluminio es $2{,}7\,g\,cm^{-3}$.
- **a** ¿Cuál es el volumen de un mol de aluminio?
- **b** ¿Cuál es el volumen medio ocupado por un átomo de aluminio?
- **c** ¿Cuál es la separación aproximada de los átomos de aluminio?

45 ¿Qué masa de oxígeno contiene $2{,}7 \times 10^{24}$ moléculas?

Ecuación de estado de un gas ideal

Centremos ahora nuestra atención en las propiedades físicas a larga escala (*macroscópicas*) de un gas ideal: cantidad de sustancia expresada en número de moles, n, presión, p, volumen, V, y temperatura absoluta, T. En conjunto, estas cuatro propiedades describen completamente las características físicas de cualquier cantidad de cualquier gas.

Si asumimos las hipótesis de la teoría cinética de los gases ideales y las leyes de la mecánica (Capítulo 2), se puede demostrar que estas cuatro variables están relacionadas mediante la ecuación:

$$\frac{pV}{nT} = \text{constante}$$

El valor de la «constante» de esta ecuación es el mismo para *todos* los gases ideales. Esto es así porque, a una misma temperatura, las moléculas de todos los gases ideales tienen la misma energía cinética de traslación media: las moléculas de gas de mayor masa se desplazan más lentamente que las más ligeras. El resultado es que una cantidad equivalente de cualquier gas ideal a una misma temperatura ejerce la misma presión sobre un mismo volumen. No hay nada en esta ecuación que sirva para representar las propiedades de un gas en concreto.

La «constante» de esta ecuación se denomina **constante universal (molar) de los gases**. (Normalmente se denomina simplemente «*constante de los gases*»). Se representa mediante el símbolo R y su valor es $8{,}31\,J\,K^{-1}\,mol^{-1}$. Este valor figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La ecuación anterior puede reescribirse de la forma siguiente:

$$pV = nRT$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La ecuación anterior se conoce como **ecuación de estado de un gas ideal**. Esta importante ecuación define el comportamiento *macroscópico* de un gas ideal. Por ejemplo, la presión, el volumen o la temperatura de una cantidad conocida, n, de un gas ideal pueden calcularse mediante la ecuación de estado si las otras dos variables son conocidas. El significado *microscópico* de un gas ideal se discutió al principio de este capítulo. La ecuación también define el significado de la constante universal de los gases ($R = pV/nT$).

Atendiendo a sus unidades, puede interpretarse fácilmente la constante universal de los gases, R, como la cantidad de energía necesaria para incrementar la temperatura de 1 mol de un gas ideal en 1 K.

la energía cinética total de traslación aleatoria total (= energía interna total) del conjunto de moléculas de 1 *mol* de un gas ideal $= \frac{3}{2}RT$

Esta ecuación no aparece en el *Apéndice de datos de Física*.

Pero ya hemos visto que la energía cinética de traslación media de una única molécula de un gas ideal $= \frac{3}{2}k_B T$ y como 1 mol contiene N_A moléculas, podemos deducir que:

la constante de Boltzman, $k_B = \frac{R}{N_A}$

Esta ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Por tanto, la ecuación para la energía cinética de traslación media de las moléculas:

$$\overline{E}_C = \frac{3}{2}k_B T$$

puede escribirse también como:

$$\overline{E}_C = \frac{3}{2}\frac{R}{N_A}T$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Naturaleza de la ciencia

La colaboración efectiva suele ser necesaria para desarrollar una teoría

A diferencia de lo que ocurre con las leyes de Newton, por ejemplo, el modelo cinético de un gas ideal no suele atribuirse a un científico conocido en particular. El modelo cinético de un gas ideal no es una teoría propuesta por un único científico tras un descubrimiento o un momento de inspiración. Es el resultado de la colaboración y la combinación gradual de ideas de muchos científicos, algunos más destacados y otros menos, a lo largo de muchos años.

La investigación y el desarrollo científico moderno se suele caracterizar por la presencia de un equipo de trabajo cuyos miembros acostumbran a provenir de distintas especialidades, distintos métodos de trabajo y distintas perspectivas. La colaboración entre los miembros de un equipo favorece un ambiente científico productivo en el que pueden prosperar ideas nuevas y originales. Pero no siempre ha sido así. En el pasado, la investigación científica tendía a ser más individualista e incluso hermética.

Ejemplos resueltos

6 ¿Cuál es la presión de 23 moles de un gas que se comporta como un gas ideal y que está en un recipiente de 0,25 m^3 a 310 K?

$$p = \frac{nRT}{V}$$

$$p = \frac{23 \times 8{,}31 \times 310}{0{,}25}$$

$$p = 2{,}4 \times 10^5 \text{ Pa}$$

7 **a** Una masa determinada de un gas ideal tiene un volumen de 23,7 cm^3 a 301 K. Si su temperatura aumenta hasta 365 K manteniéndose la presión, ¿cuál será el nuevo volumen, V_2?

b Explica por qué ha aumentado el volumen.

a $\frac{V}{T} = \frac{nR}{p} = \text{constante}$

$$\frac{23{,}7}{301} = \frac{V_2}{365}$$

$$V_2 = 28{,}7 \text{ cm}^3$$

b El volumen ha aumentado porque la presión no ha cambiado. Las moléculas se mueven más rápido y colisionan con las paredes más a menudo (y con más fuerza) creando una presión más elevada, a menos que el volumen aumente.

8 Estima la energía cinética de traslación total del conjunto de moléculas de una habitación de tamaño medio.

volumen aproximado = $4 \times 4 \times 3 \approx 48 \text{ m}^3$

masa aproximada de aire = 48 × densidad del aire (1,3 kg m^{-3}) = 62 kg

número aproximado de moles = $\frac{\text{masa de aire}}{\text{masa molar media}} = \frac{62}{0{,}029} = 2\,100$ moles

energía cinética aproximada = número de moles × $E_C \text{ mol}^{-1} = 2\,100 \times \frac{3}{2}RT$

A una temperatura de 300 K (27 °C), este valor es:

$2\,100 \times 1{,}5 \times 8{,}31 \times 300 \approx 8 \times 10^6$ J

Figura 3.33 *Oxígeno en forma gaseosa almacenado en cilindros metálicos resistentes*

Diferencias entre gases ideales y gases reales

Evidentemente, no es exactamente lo mismo un gas *real* que un gas *ideal*. Sin embargo, las diferencias entre ambos suelen ser, aunque no siempre, insignificantes, de modo que se acostumbra a suponer que la ecuación de estado de un gas ideal puede utilizarse para realizar cálculos para una muestra de un gas real. Los gases reales, no obstante, *no* se comportan como gases ideales (obedeciendo, por tanto, la ecuación de estado) cuando las fuerzas intermoleculares se hacen significativas porque las moléculas están muy juntas, o bien porque los tamaños moleculares ya no pueden considerarse despreciables en comparación con sus separaciones. Estas situaciones pueden tener lugar a presiones y densidades elevadas o a bajas temperaturas.

Cuando un gas se enfría, las moléculas se mueven cada vez más despacio y la presión disminuye (suponiendo que ni la masa ni el volumen cambien). A medida que desciende la temperatura, los gases reales se transforman en líquidos y después en sólidos, si la temperatura es tan baja que las moléculas no tienen suficiente energía cinética para vencer las fuerzas intermoleculares. Sin embargo, un gas ideal no puede licuarse.

Para almacenar o transportar gases suele ser necesario reducir su volumen mediante la utilización de altas presiones y/o transformándolos en líquidos (Figura 3.33). Los contenedores deben ser muy resistentes y deben manipularse con cuidado; bajo estas condiciones, no cabe esperar que los gases se comporten *idealmente*.

46 ¿Qué volumen de gas (en cm^3) contiene 0,780 moles de gas a 264 K a presión atmosférica normal ($1{,}00 \times 10^5$ Pa)?

47 ¿A qué temperatura (°C) se encuentran 0,46 moles de gas si la presión ejercida sobre un recipiente de 8520 cm^3 es $1{,}4 \times 10^5$ Pa?

48 ¿Qué cantidad aproximada de aire ejercería una presión de $2{,}60 \times 10^7$ Pa sobre un cilindro de 12 000 cm^3 utilizado como bombona de aire para buceo (Figura 3.34)?

Figura 3.34 *Ser buceador implica aprender sobre las variaciones de la presión de un gas bajo el agua (véase cuestión 48)*

49 a ¿Qué es la masa molar del oxígeno?
b ¿Qué volumen ocuparía 1,0 kg de oxígeno a 25 °C y $1{,}3 \times 10^5$ Pa?

50 ¿Qué presión se ejerce cuando se colocan 2,49 g de gas helio en un contenedor de 600 cm^3 a −30,5 °C?

51 a Un recipiente contiene 4060 cm^3 de un gas al doble de la presión atmosférica normal ($2{,}00 \times 10^5$ Pa). Si el volumen se reduce hasta 3240 cm^3 a la misma temperatura, ¿cuál será la nueva presión?
b Explica por qué ha aumentado la presión.

52 a Una determinada cantidad de helio en una botella ejerce una presión de $2{,}12 \times 10^6$ Pa a −234 °C. Si se aumenta la temperatura exactamente 100 °C, calcula el valor de la nueva presión (suponiendo que la botella no se expande).
b Explica por qué aumenta la presión.
c Explica por qué el uso de la ecuación de estado podría llevar a un resultado inexacto en este ejemplo.

Figura 3.35 *Globo aerostático*

53 Un gas a 287 K tiene un volumen de 2,4 m^3 y una presión de $1{,}2 \times 10^5$ Pa. Cuando se comprime, la presión aumenta hasta $1{,}9 \times 10^5$ Pa y la temperatura aumenta 36 K. ¿Cuál será el nuevo volumen?

54 En el recipiente C hay 4 moles de gas. El recipiente D está a la misma temperatura pero contiene 3 moles de gas en el doble de volumen. ¿Cuál es el valor del cociente p_C/p_D?

55 El volumen de un gas se duplica, pero la presión debe mantenerse constante. ¿Cuál será la temperatura final (Celsius) si la temperatura original era 17 °C?

56 Explica cómo se puede controlar la altura de crucero de un globo aerostático como el que se muestra en la Figura 3.35.

Enlace con la teoría del conocimiento

Los modelos siempre presentan limitaciones

¿Cuándo es un modelo de una situación «ideal» lo «suficientemente bueno» como para considerarlo conocimiento?

No podemos utilizar la percepción humana (por ejemplo la vista) directamente para intentar comprender el comportamiento de las moléculas de un gas. Esta es la razón por la que necesitamos un «modelo». Pero, ¿podemos estar seguros en algún momento de que un modelo es una representación verdadera de la realidad si nunca podemos observar los sucesos de forma directa? ¿O bien siempre nos quedará alguna duda? Y, si el modelo funciona, ¿importa realmente si el modelo es o no una «verdadera» representación de algo que, de todos modos, no podemos observar?

¿Puede un modelo del sistema solar, por ejemplo, considerarse conocimiento de alto nivel, porque podemos observarlo directamente y registrar el movimiento de los planetas?

Investigación experimental del comportamiento macroscópico de los gases reales

Dado un recipiente sellado que contiene un gas en su interior, existen cuatro propiedades físicas macroscópicas del gas que podemos medir de forma relativamente sencilla: la masa, el volumen, la temperatura y la presión. *Para una masa fija de gas*, las otras tres propiedades están interrelacionadas; es decir, si una de ellas se modifica, al menos una de las dos restantes debe modificarse, e incluso las dos.

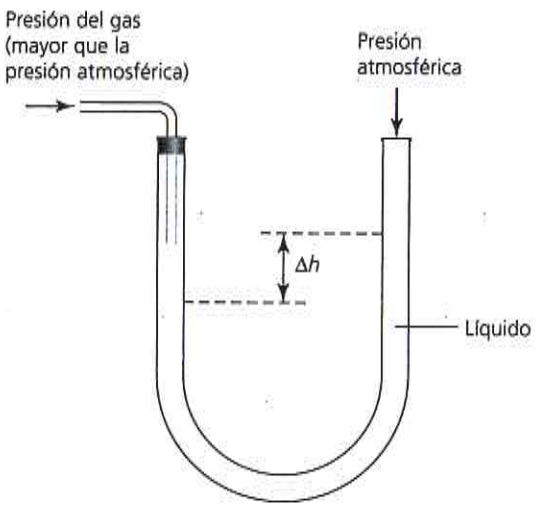
Perspectivas adicionales

Medida de la presión de un gas

Una pequeña *diferencia* en la presión de un gas puede medirse utilizando un simple tubo en forma de U que contiene un líquido, tal como se muestra en la Figura 3.36. El gas que procede de un recipiente situado a la izquierda (y que no se muestra) está a una presión más elevada que la presión atmosférica (entrada derecha del tubo en U). Este tubo, que forma parte de un aparato, se denomina *manómetro*.

La diferencia de presión, Δp, produce una diferencia en los niveles de líquido de ambas partes del tubo; la altura Δh es una medida de dicha diferencia de presión. Podría registrarse, por ejemplo, como 14,0 cm de agua. Si se utilizara mercurio en lugar de agua, Δh estaría en torno a 1 cm, ya que el mercurio es aproximadamente 14 veces más denso que el agua. Para convertir la diferencia de presión a pascales, se puede utilizar la fórmula $\Delta p = \Delta h \rho g$, donde ρ es la densidad del líquido que se introduce en el manómetro. (Esta ecuación puede obtenerse a partir de $p = F/A$, considerando el peso adicional del líquido en uno de los lados y el área de la sección transversal del tubo.)

■ **Figura 3.36**
Manómetro simple



Para medir directamente la presión real del gas sobre el recipiente utilizando un manómetro (en lugar de medir la diferencia de presión) habría que extraer completamente el aire de la parte derecha (creando un *vacío*). La diferencia de altura Δh sería mucho mayor y se necesitaría un tubo muy largo, a menos que se utilizara mercurio.

El instrumento diseñado para medir la presión atmosférica se denomina *barómetro*. En general, los instrumentos diseñados para medir la presión de un gas se suelen denominar *manómetros*. Existen diversos diseños.

1 ¿Cuál es la presión que corresponde a 14 cm de agua expresada en pascales?

2 **a** Sugiere una longitud adecuada de un tramo de tubo lleno de mercurio para medir la presión atmosférica (alrededor de 1×10^5 Pa). Explica tu respuesta.

b ¿Por qué sería necesario que el tramo de tubo fuera resistente?

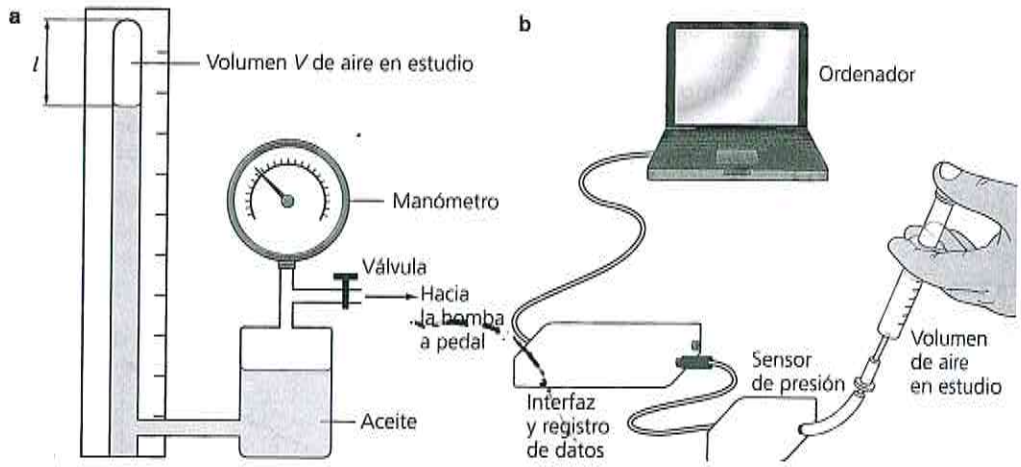
Las leyes de los gases

A partir de tres experimentos de física clásicos se demostró que *todos* los gases, bajo la mayoría de circunstancias, siguen los mismos patrones simples de comportamiento (se suelen llamar las tres **leyes de los gases**). Recomendamos a los estudiantes que utilicen modelos informáticos para investigar las propiedades físicas de los gases bajo un número mayor de circunstancias que las que se pueden tener en cuenta normalmente en un laboratorio académico.

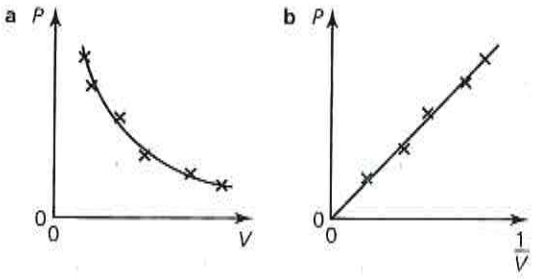
Variación del volumen de un gas respecto a la presión: ley de Boyle

En la Figura 3.37 se muestran dos conjuntos de aparatos que podrían utilizarse para investigar la variación del volumen de un gas cuando se modifica la presión que actúa sobre una masa fijada. Cuando se utiliza una fuerza para cambiar el volumen de un gas, tiende a variar su temperatura, hecho que complica los resultados. Para minimizar este efecto indeseado, los cambios se deben hacer lentamente.

Los resultados experimentales habituales se representan en la Figura 3.38a. La línea que aparece en la gráfica se denomina isoterma («iso» significa «igual»; todos los puntos de una isoterma corresponden al gas a la misma temperatura).



■ **Figura 3.37**
Dos métodos para investigar la ley de Boyle



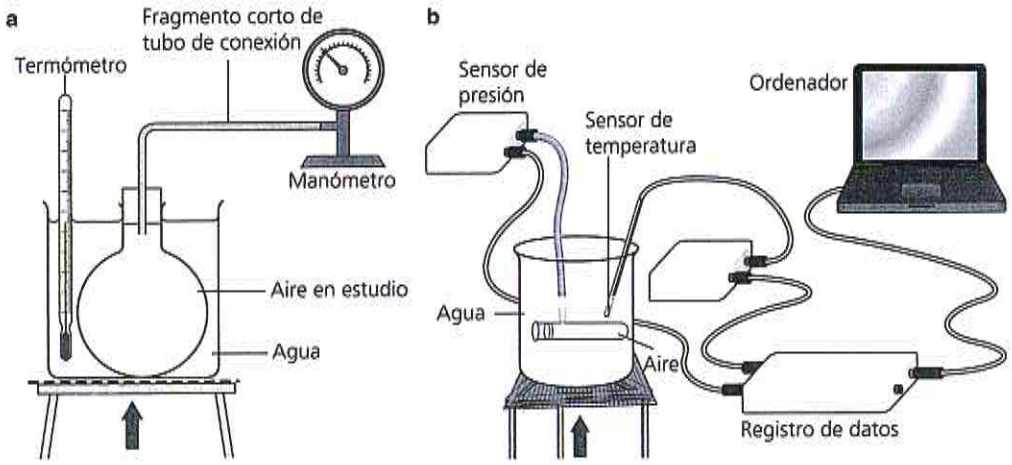
■ **Figura 3.38**
Dos gráficas que muestran que la presión del gas es inversamente proporcional al volumen

En la Figura 3.38b se representan los mismos datos de otro modo, con objeto de obtener una gráfica lineal que pase por el origen, confirmándose que, para una masa fija de gas a una temperatura constante, la presión es inversamente proporcional al volumen (*ley de Boyle*):

$$p \propto \frac{1}{V}$$

Variación de la presión de un gas respecto a la temperatura: ley de la presión

En la Figura 3.39 se muestran dos conjuntos de aparatos que podrían utilizarse para investigar la variación de la presión de un gas cuando se modifica la temperatura de una masa fija de gas a volumen constante.

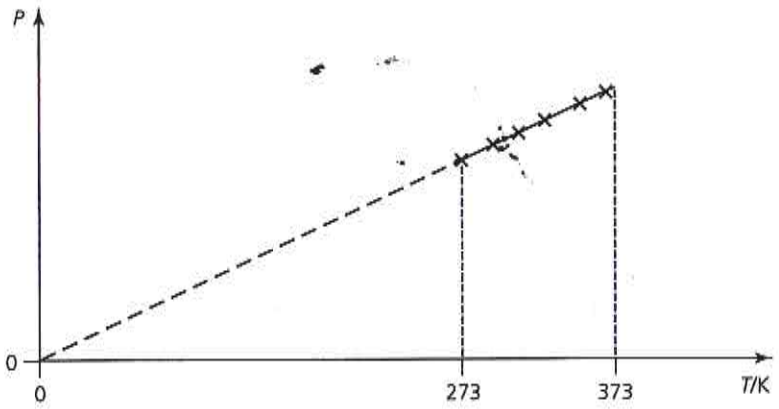


■ **Figura 3.39**
Dos conjuntos de aparatos que pueden utilizarse para investigar la ley de la presión

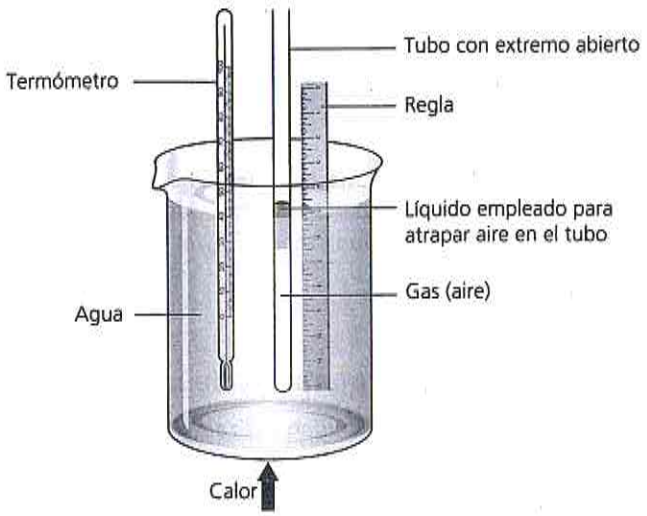
Los resultados experimentales habituales se representan en la Figura 3.40. Estos resultados se suelen obtener en el intervalo de temperaturas comprendido entre 0 °C y 100 °C (entre 273 K y 373 K), por tanto, se tiene que hacer una extrapolación para predecir los datos correspondientes a temperaturas más bajas. Cerca de –273 °C (**cero absoluto**, 0 K), la predicción para la presión es que se reduzca a cero. El motivo de esta predicción es que a esta temperatura de 0 K prácticamente todo el movimiento molecular se ha detenido.

Para una masa fija de gas a volumen constante, la presión es proporcional a la temperatura (K) (*ley de la presión*):

$$p \propto T$$



■ **Figura 3.40**
La presión del gas es proporcional a la temperatura absoluta (K)



■ **Figura 3.41**
Aparato sencillo para investigar la ley de Charles

Variación del volumen de un gas respecto a la temperatura: ley de Charles

En la Figura 3.41 se muestra un aparato sencillo que podría utilizarse para investigar como varía el volumen de un gas cuando se modifica la temperatura de una masa fija de gas mantenida a presión constante. Cuando el agua se calienta, fluye energía térmica hacia el gas atrapado, que se expande (el líquido se desplaza), manteniéndose a presión constante porque el extremo abierto del tubo permanece a la presión atmosférica.

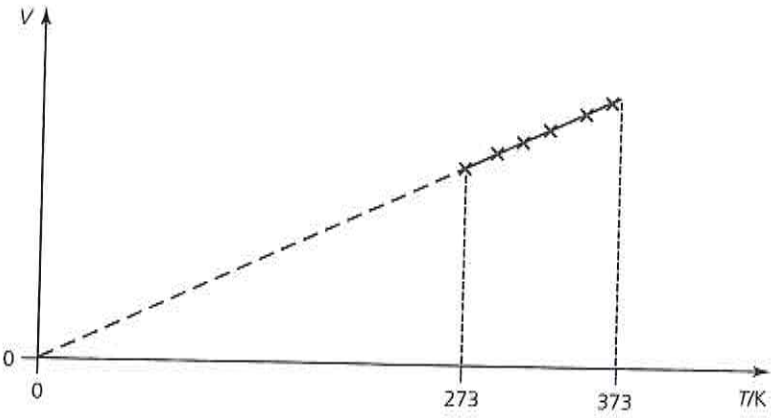


Figura 3.42
El volumen del gas es proporcional a la temperatura absoluta (K)

Los resultados experimentales habituales se representan en la Figura 3.42. Podemos predecir que el volumen se reduce a cero cerca de –273 °C (cero absoluto, 0 K).

Para una masa fija de gas a presión constante, el volumen es proporcional a la temperatura (K) (*ley de Charles*):

$$V \propto T$$

Combinación de las leyes de los gases

Los resultados de los experimentos relativos a las tres leyes de los gases se pueden combinar de la forma siguiente:

$$pV \propto T$$

Otros experimentos más exhaustivos confirman que, bajo la mayoría de circunstancias, las propiedades físicas de los gases reales pueden describirse mediante la ecuación:

$$pV = nRT$$

Esta ecuación *empírica* (basada en resultados experimentales) es análoga a la *ecuación de estado teórica* que se discute en la página 131. En otras palabras, cuando se desarrolló la ecuación, se confirmaron los resultados experimentales que ya se habían obtenido.

Comprender cómo se producen los cambios de *estado* de un gas y cómo representarlos gráficamente es clave para el estudio de los motores térmicos (Opción B).

Utilización de la energía cinética para explicar las leyes de los gases cualitativamente

- *Ley de Boyle* – Cuando el volumen de un gas disminuye, las moléculas impactan sobre las paredes con más frecuencia porque tienen menos distancia que recorrer entre colisiones. Por tanto, cuanto menor es el volumen, mayor es la presión.
- *Ley de la presión* – Cuando la temperatura de un gas aumenta, la velocidad molecular media aumenta. Las moléculas colisionan con las paredes con más fuerza y con más frecuencia. (Hay más colisiones con las paredes por segundo). Por tanto, cuanto mayor es la temperatura, mayor es la presión.
- *Ley de Charles* – Cuando la temperatura de un gas aumenta, la velocidad molecular media aumenta, de modo que las moléculas colisionan con las paredes con más frecuencia y con más fuerza. El resultado es una fuerza neta hacia fuera de las paredes y en dirección al recipiente, pero si alguna de las paredes es movible, el gas se expandirá manteniendo la misma presión en el interior de las paredes que en el exterior de ellas. Por tanto, cuanto mayor es la temperatura, mayor es el volumen (aunque solo si el gas puede expandirse libremente).

57 a Explica por qué las fuerzas entre las moléculas de un sólido o de un líquido son mucho más intensas que las fuerzas intermoleculares de un gas.
b Pueden las fuerzas intermoleculares alcanzar el valor cero? (Observa la Figura 3.5). Razona tu respuesta.

58 a Explica detalladamente lo que les ocurre a las moléculas de un gas caliente colocado en el interior de un recipiente más frío.
b ¿Qué les ocurre a la energía interna y a la temperatura de las paredes y del gas?

59 a Explica por qué se predice que la presión de un gas ideal será cero si se enfría hasta –273 °C.
b Si se enfrían suficientemente, los gases reales se condensan y se convierten en líquidos mucho antes de alcanzar la temperatura de –273 °C. Explica esta observación haciendo referencia a las velocidades moleculares y a las fuerzas intermoleculares.

60 Copia las Figuras 3.38a y 3.38b y añade a continuación otra línea isoterma a cada una con el objeto de representar los resultados que se obtendrían con el mismo gas y el mismo aparato pero a mayor temperatura.

Perspectivas adicionales

Comprender la aleatoriedad

A lo largo de este tema se ha utilizado frecuentemente el término «aleatorio» con respecto a la energía o al movimiento. ¿Pero qué significa exactamente la palabra «aleatorio»? Esta palabra tiene diversos usos científicos y, generalmente, con ligeras diferencias de significado. Por ejemplo, podemos decir que el resultado de lanzar un dado con seis caras es aleatorio porque no podemos predecir qué ocurrirá, aunque probablemente entendamos que hay una posibilidad entre seis de que salga cada uno de los seis posibles resultados. En este caso, todos los resultados son igualmente probables. Otro ejemplo podría ser el de «escoger una carta al azar» de una baraja de 52 cartas. A veces utilizamos el término «aleatorio» para sugerir que algo no está planificado, por ejemplo un turista puede caminar aleatoriamente por las calles de una ciudad.

La impredecibilidad es una característica fundamental de los sucesos aleatorios y ciertamente es en gran parte lo que queremos expresar cuando decimos que una molécula de un gas se mueve aleatoriamente. Todas las posibles direcciones del movimiento pueden ser igualmente probables, pero no se puede decir lo mismo para las velocidades. Algunas velocidades son indudablemente más probables que otras. Por ejemplo, a temperatura ambiente una velocidad molecular de $500\,m\,s^{-1}$ es mucho más probable que una de $50\,m\,s^{-1}$. De manera análoga, cuando nos referimos a las energías cinéticas aleatorias de las moléculas (en cualquiera de las tres fases de la materia) estamos diciendo que no podemos conocer o predecir la energía de las moléculas individualmente, aunque algunos valores son más probables que otros. Pero aún existe otro significado que va más allá: estamos sugiriendo que las moléculas individuales se comportan de forma independiente y que sus energías están desordenadas.

Aunque resulte sorprendente, en la teoría cinética el comportamiento aleatorio de un número muy grande de moléculas individuales a escala microscópica conduce a una completa predictibilidad en nuestro mundo macroscópico cotidiano. Ideas similares se producen en otras áreas de la física, sobre todo en la desintegración radiactiva (Capítulo 7), donde el comportamiento de un átomo individual no se puede conocer, pero la actividad total de una fuente radiactiva es predecible. Por descontado, las compañías de seguros y los casinos pueden obtener muchas ventajas analizando las estadísticas de las variables aleatorias.

1 Si se lanzan 10 monedas al aire y salen 3 caras y 7 cruces, no nos sorprende demasiado. Pero si lanzamos 100 monedas y solo salen 30 caras, sería extraño. Y si lanzamos 1 000 monedas al aire y salen 300 caras y 700 cruces, sería casi completamente increíble. Explica por qué.

2 Explica por qué las moléculas de un gas consideradas de forma individual colisionan con las paredes del recipiente que lo contiene produciendo una presión que se predice constante.

3 Escoge al azar cinco números entre 1 y 10. ¿Cómo harías la elección? ¿Cómo se podría saber si los números que has escogido están realmente tomados aleatoriamente con solo verlos?

Selección de preguntas de examen

Hoja 1 Cuestiones del IB y cuestiones del tipo IB

1 La temperatura de un gas ideal es una medida de:

A. El momento medio de las moléculas.
B. La velocidad media de las moléculas.
C. La energía cinética de traslación media de las moléculas.
D. La energía potencial media de las moléculas.

2 Si el volumen de una masa fija de un gas ideal a temperatura constante disminuye, la presión del gas aumenta. Esto ocurre porque:

A. Las moléculas colisionan entre sí con mayor frecuencia.
B. Las moléculas colisionan más frecuentemente con las paredes del contenedor.
C. Las moléculas se mueven a una velocidad media más elevada.
D. Las moléculas ejercen fuerzas medias más intensas sobre las paredes durante las colisiones.

3 La capacidad calorífica específica de una sustancia se define como la cantidad de energía térmica que se necesita para aumentar la temperatura de:

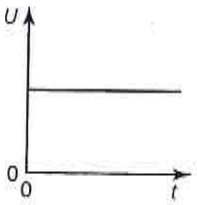
A. La masa de la sustancia en 1 K.
B. El volumen de la sustancia en 1 K.
C. Una unidad de volumen de la sustancia en 1 K.
D. Una unidad de masa de la sustancia en 1 K.

4 ¿Cuál de los siguientes supuestos es fundamental para la teoría cinética de los gases ideales?

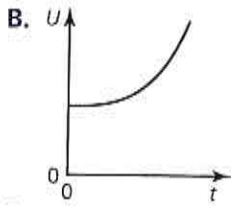
A. Las fuerzas entre las moléculas son cero.
B. Todas las moléculas viajan a la misma velocidad.
C. Las energías potenciales moleculares son constantes.
D. Las moléculas tienen momento cero.

5 Un sistema está compuesto por un cubito de hielo colocado en una taza con agua. El sistema está aislado de su entorno desde el punto de vista térmico. El agua se encuentra originalmente a 20 °C. ¿Cuál de estas gráficas representa mejor la variación de la energía interna total del sistema, U, con respecto al tiempo, t?

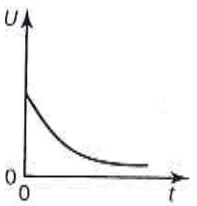
A.



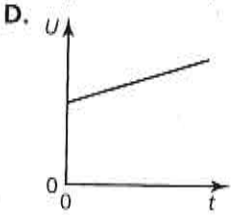
B.



C.



D.



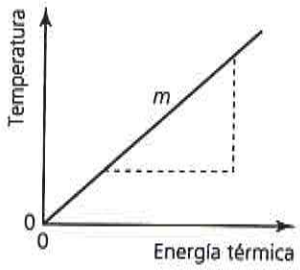
¿Cuál de los siguientes valores corresponde a la conversión correcta de una temperatura de 100 K a grados Celsius

A. −373 °C **B.** −173 °C **C.** 173 °C **D.** 373 °C

¿Cuál de las afirmaciones siguientes es la correcta respecto a la energía de las moléculas de un gas ideal?

A. Las moléculas solo tienen energía cinética.
B. Las moléculas solo tienen energía térmica.
C. Las moléculas solo tienen energía potencial.
D. Las moléculas solo tienen energía cinética y energía potencial.

8 Un bloque de cobre de masa M se calienta mediante un calentador de inmersión. En la gráfica se representa la variación de la temperatura del bloque en función de la energía térmica suministrada. La pendiente de la recta es m.



¿Cuál de las expresiones siguientes corresponde a la capacidad calorífica específica del bloque?

A. m **B.** $\frac{1}{m}$ **C.** mM **D.** $\frac{1}{mM}$

© IB Organization

9 La temperatura de un gas ideal ha aumentado de 50 °C hasta 100 °C. La energía cinética de traslación media de sus moléculas ha aumentado un factor:

A. 1,2 **B.** 2,0 **C.** 4,0 **D.** 50

10 Dos objetos cercanos se encuentran a la misma temperatura. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es correcta?

A. Los objetos tienen la misma energía interna.
B. Los objetos tienen la misma capacidad térmica.
C. No hay intercambio de energía térmica entre los objetos.
D. El intercambio neto de energía térmica entre los objetos es cero.

© IB Organization

Hoja 2 Preguntas del IB y preguntas del tipo IB

1 Esta cuestión es sobre el cambio de fase de un líquido y el calor latente de vaporización.

a. Un líquido en un calorímetro se calienta hasta su punto de ebullición durante un periodo de tiempo contabilizado. Se dispone de los datos siguientes:
potencia del calentador = 15 W
tiempo durante el que se calienta el líquido hasta su punto de ebullición = $4,5 \times 10^2$ s
masa de líquido que se evapora = $1,8 \times 10^{-2}$ kg.
Utiliza los datos anteriores para determinar el calor latente específico de vaporización del líquido. (1)

b. Enuncia y explica un motivo por el que el cálculo del apartado anterior da lugar a un valor del calor latente específico de vaporización del líquido superior al valor real. (2)

© IB Organization

2 a La energía interna de un trozo de cobre aumenta cuando se calienta.

i. Explica qué se entiende por energía interna y calentamiento en este contexto. (3)

ii. El trozo de cobre tiene una masa de 0,25 kg. El incremento en la energía interna del cobre es $1,2 \times 10^3$ J y el incremento de temperatura es de 20 K. Estima la capacidad calorífica específica del cobre. (2)

b. Se deja un gas ideal en un cilindro con un pistón que puede desplazarse. Se calienta el gas hasta que su energía interna aumenta y la presión se mantiene constante. Utiliza el modelo molecular de los gases ideales para explicar:

i. el incremento de energía interna (1)

ii. cómo permanece constante la presión. (3)

© IB Organization

3 a ¿Bajo qué condiciones puede aplicarse la ecuación $pV = nRT$ a los gases reales? (2)

b. Un globo que contiene aire se deja en un congelador a una temperatura de −8,8 °C. Cuando su volumen es de 210 cm^3 y su presión es $1,60 \times 10^5$ Pa se traslada y se coloca en el exterior, donde la temperatura es 31 °C. Si el volumen aumenta hasta 224 cm^3, ¿cuál es la nueva presión en el interior del globo? (2)

c. Si el globo contuviera un poco de agua, explica qué diferencias cabría esperar. (2)

4 Ondas

IDEAS FUNDAMENTALES

- El estudio de las oscilaciones es básico en muchas áreas de la física en las que aparece el movimiento armónico simple (MAS), una oscilación fundamental que tiene lugar en diversos fenómenos naturales.
- Se pueden estudiar muchos tipos de ondas. La característica común que comparten todas las ondas viajeras consiste en que transportan energía, pero el medio por el que viajan en general no queda perturbado de forma permanente.
- Todas las ondas se pueden describir mediante los mismos conjuntos de ideas matemáticas. Si conocemos con detalle lo que ocurre en una determinada zona tenemos la posibilidad de predecir lo que sucederá en otra.
- Las ondas interactúan con el medio y con otras ondas de varias maneras que pueden llegar a ser inesperadas y útiles.
- Cuando las ondas viajeras se encuentran, se pueden superponer para formar ondas estacionarias en las que no se produce transferencia de energía.

4.1 Oscilaciones

El estudio de las oscilaciones es básico en muchas áreas de la física en las que aparece el movimiento armónico simple (MAS), una oscilación fundamental que tiene lugar en diversos fenómenos naturales

Los diversos tipos de oscilación que se enumeran abajo muestran hasta qué punto las oscilaciones forman parte del mundo que nos rodea y sugieren por qué su estudio constituye una parte tan importante de la física. Aunque los objetos que pueden oscilar son muy diversos, la mayor parte de los movimientos oscilatorios se puede estudiar y comprender mejor mediante un modelo simple denominado **movimiento armónico simple**.

Figura 4.1
Oscilaciones de las alas de un colibrí

Ejemplos de oscilaciones

Existen muchas clases de movimientos repetidos, tanto en la naturaleza como en el mundo artificial en el que vivimos. Algunos ejemplos de estas oscilaciones son:

- las mareas del océano
- el movimiento de nuestras piernas cuando caminamos
- el latido del corazón
- un mecanismo de relojería
- la vibración de los átomos
- los mecanismos y los motores
- una cuerda de guitarra que emite una nota musical
- nuestros tímpanos (cuando escuchan un sonido)
- los circuitos electrónicos que producen ondas de radio y microondas
- las ondas de diversos tipos, entre las que se encuentra la luz, que se transmite mediante oscilaciones.

Y existen muchísimos más ejemplos que se pueden encontrar en la ingeniería mecánica y eléctrica.

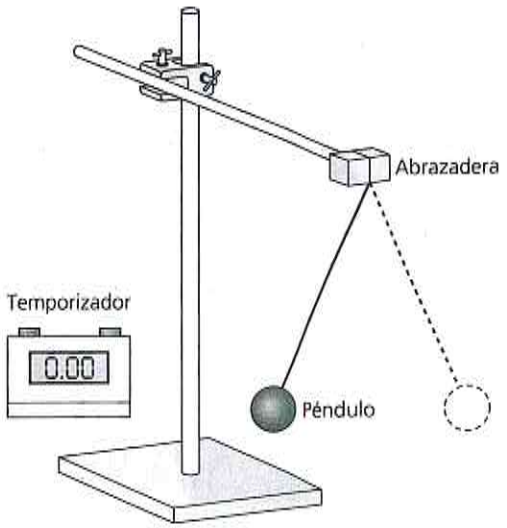
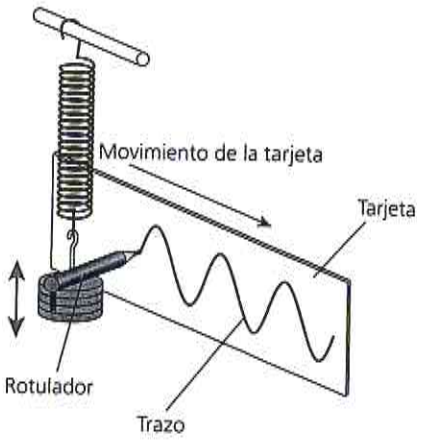


Figura 4.2
Estudio del movimiento de un péndulo

Las oscilaciones pueden ser muy rápidas y difíciles de observar. En un laboratorio escolar se suele comenzar el estudio de las oscilaciones con experimentos realizados con osciladores muy simples, que son fáciles de visualizar y que oscilan a velocidades apropiadas, por ejemplo un péndulo o una masa que cuelga de un muelle (o entre dos muelles) (véanse Figuras 4.2 y 4.3). Estos dos osciladores tan simples se comportan de forma similar a otros mucho más complejos, de modo que los podemos utilizar como **modelos** básicos que podemos aplicar a otras situaciones.

Para el estudio detallado de oscilaciones muy lentas puede resultar muy útil un túnel de viento suavemente curvado en el plano vertical. En un laboratorio escolar también se pueden estudiar otras oscilaciones, como la de una masa que vibra en el extremo de una regla, la de un líquido en un tubo en forma de U, la de una pelota que rueda por una superficie curvada o la del hielo que flota en el agua.



■ **Figura 4.3** *Estudio de la oscilación de una masa colocada en el extremo de un muelle*

■ Oscilaciones armónicas simples

Los experimentos como los que se representan en la Figura 4.2 y en la Figura 4.3 demuestran una importante propiedad de muchos osciladores: para un oscilador determinado, el tiempo que tarda en producirse cada oscilación es el mismo, con independencia del desplazamiento inicial. Esto significa que cuando la energía se disipa (y en consecuencia las velocidades máximas y los desplazamientos disminuyen) el tiempo que tarda en producirse cada oscilación *sigue* siendo el mismo.

La palabra **isócrono** se utiliza para describir sucesos que ocupan tiempos iguales. En el mundo macroscópico las oscilaciones perfectamente isócronas no son posibles, pero muchas oscilaciones reales (un péndulo, por ejemplo) son casi isócronas. Este tipo de oscilaciones se conocen como **oscilaciones armónicas simples**.

Aplicaciones

Oscilaciones y medida del tiempo

Desde mediados del siglo XVII y hasta hace menos de un siglo, en los relojes más fiables y exactos del mundo se han utilizado péndulos. En la actualidad, en cambio, se emplean de forma generalizada las oscilaciones electrónicas isócronas. En el mundo moderno existen muchos motivos (por ejemplo viajes, comunicaciones por ordenador y detectores de ubicación) por los que es necesario que los distintos países se pongan de acuerdo en cuanto a los procedimientos de registro del tiempo y la sincronización de relojes a nivel mundial. El uso de Internet facilita todos estos acuerdos.

Nuestra impresión sobre el paso del tiempo es un interesante tema filosófico y científico que se basa en gran parte en la repetición de sucesos, como el giro diario de la Tierra sobre su eje, que nos proporciona la noche y el día, o la órbita anual de la Tierra alrededor del Sol, que da lugar a las estaciones.

■ **Figura 4.4**
El funcionamiento de un reloj digital se basa en oscilaciones eléctricas

El sistema de tiempo del planeta Tierra, consistente en años, días, horas, minutos y segundos, le parecería extraño a un extraterrestre. De hecho, la Tierra gira una vez sobre su eje no cada 24 horas, sino cada 23 horas y 56 minutos. Nuestro día de 24 horas se basa en el tiempo que tarda el Sol en volver a su elevación máxima visto desde la Tierra. Este tiempo se ve afectado no solo por la propia rotación de la Tierra, sino también por el movimiento diario de la Tierra en su órbita alrededor del Sol, aunque en mucha menor cuantía.

La velocidad de rotación de la Tierra también disminuye a una tasa de unos 2 segundos cada 100 000 años, de manera que la longitud de un día va lentamente en aumento de forma inexorable. Este fenómeno tiene su origen principalmente en la interacción gravitatoria entre la Tierra y la Luna.

1 Antes de la invención de los relojes de péndulo, ¿cómo se medían los intervalos cortos de tiempo?

2 Imagina que estás mirando una grabación en video del balanceo de un péndulo. Explica cómo podrías saber si el video se está reproduciendo hacia delante o hacia atrás. Discute si esto nos ayuda a entender el significado del tiempo.

Periodo, frecuencia, amplitud, desplazamiento y diferencia de fase

El motivo por el que una oscilación puede ser armónica y simple se discute más adelante en este capítulo. En primer lugar necesitamos definir la terminología básica que empleamos para describir las oscilaciones.

Se pueden producir oscilaciones siempre que un objeto se desplaza de su **posición de equilibrio** y experimenta a continuación una **fuerza de «recuperación»** que lo devuelve al lugar de donde venía, ya sea tirando del objeto o empujándolo. El objeto gana energía cinética y pasa por la posición de equilibrio, pero ahora su desplazamiento se produce en sentido contrario al desplazamiento original. La fuerza de recuperación actúa también en sentido contrario de forma que el objeto decelera, se para y vuelve a acelerar para volver de nuevo a la posición de equilibrio. El proceso se sigue repitiendo.

La posición de equilibrio (o posición media) es la posición en la que no actúa ninguna fuerza resultante sobre el objeto. En otras palabras, la posición de equilibrio es el lugar donde se quedaría el objeto si no hubiera sido perturbado y el lugar al que tiende a volver cuando las oscilaciones han terminado.

El **desplazamiento**, x, de un oscilador se define como la distancia en una dirección determinada desde su posición de equilibrio.

(Es una definición análoga a la definición general de desplazamiento de la página 21). Durante una oscilación el desplazamiento varía de forma continua.

Cuando describimos el movimiento repetido de un objeto se pueden plantear dos preguntas evidentes: ¿qué extensión tienen las oscilaciones? Y, ¿con qué rapidez oscila el objeto?

La **amplitud** de un oscilador se define como su desplazamiento máximo. El desplazamiento máximo es la distancia desde la posición de equilibrio hasta el punto más lejano del recorrido.

Utilizamos el símbolo $\mathbf{x_0}$ (o a veces A) para la amplitud. Una amplitud mayor significa que hay más energía en el sistema.

El **periodo**, T, de una oscilación es el tiempo que tarda en producirse una oscilación completa. Es decir, el tiempo mínimo necesario para volver a la misma posición (desplazándose en la misma dirección).

Una oscilación completa se suele denominar un **ciclo**.

La mayoría de las oscilaciones son rápidas, es decir, puede haber un gran número de oscilaciones cada segundo. En consecuencia, suele ser más conveniente referirse al número de oscilaciones cada segundo (más que al periodo).

La **frecuencia**, f, de un oscilador se define como el número de oscilaciones por unidad de tiempo (normalmente cada segundo).

Cuando un objeto experimenta una perturbación y se le deja oscilar sin interferencias, se dice que oscila a su **frecuencia natural**.

La frecuencia y el periodo de una oscilación son dos formas equivalentes de expresar una misma información. Ambos conceptos están conectados por la sencilla fórmula:

$$T = \frac{1}{f}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

El concepto de frecuencia es tan útil que tiene su propia unidad. Una frecuencia de una oscilación por segundo recibe el nombre de **hercio**, Hz. También se utilizan a menudo las unidades kHz (10^3 Hz), MHz (10^6 Hz) y GHz (10^9 Hz).

Diferencia de fase

Es posible que queramos comparar dos o más oscilaciones similares que tienen la misma frecuencia. Por ejemplo, las de varios niños que se columpian juntos en un parque, como en la Figura 4.5.

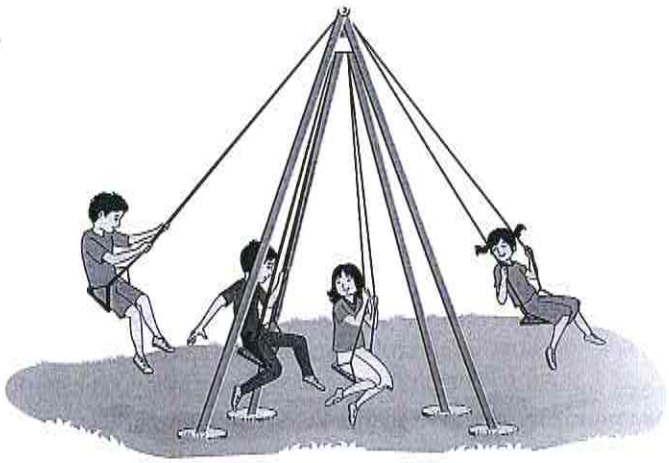


Figura 4.5 *Cuatro oscilaciones desfasadas*

Si dos oscilaciones continúan haciendo exactamente lo mismo en el mismo momento, se dice que están **en fase (sincronizadas)**: siempre pasan por su posición de equilibrio moviéndose en la misma dirección y en el mismo momento. En este contexto la palabra «fase» significa un estadio en un proceso (oscilación). No debe confundirse con una fase de la materia (Capítulo 3).

Si dos oscilaciones similares no se están moviendo en fase, decimos que presentan una **diferencia de fase**.

Si una oscilación siempre se «adelanta» a la otra exactamente media oscilación (o se «atrasa» media oscilación), ambas oscilaciones se mueven en sentido opuesto cuando pasan por la posición de equilibrio y se dice que están **en contrafase**.

Dos oscilaciones pueden estar desfasadas en una determinada cantidad entre estos dos extremos, pero la medida detallada de la diferencia de fase no es temario de este capítulo (véase el Capítulo 9).

Ejemplo resuelto

1 Un niño que se está columpiando hace cuatro oscilaciones completas en 10,4 s.
   a ¿Cuál es el periodo?
   b ¿Cuál es la frecuencia?

   a $T = \frac{10,4}{5,00} = 2,08\,\text{s}$

   b $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,08} = 0,481\,\text{Hz}$

1 Se temporiza el movimiento de un péndulo y se determina que produce exactamente 50 oscilaciones en 43,6 s.
   a ¿Cuál es su periodo?
   b ¿Cuál es su frecuencia?
   c ¿Cuántas oscilaciones se producirán en 5 minutos exactamente?
   d Explica por qué es una buena idea que en un experimento para determinar el periodo de un péndulo se mida el tiempo total que se tarda en realizar un gran número de oscilaciones.

2 ¿Cuál es el periodo de una onda de sonido que tiene una frecuencia de 3,2 kHz?

3 Las ondas de radio oscilan muy rápidamente.
   a ¿Cuál es la frecuencia en Hz de una onda de radio con un periodo de 5×10^{-9}s?
   b Expresa la misma frecuencia en MHz.

4 Un péndulo tiene una frecuencia de 0,5 Hz y una amplitud (medida a lo largo del arco) de 2,4 cm. Después de soltarlo desde su desplazamiento lateral izquierdo máximo,
   a ¿cuál es su desplazamiento al cabo de:
      i 0,5s
      ii 3,0s?
   b ¿Qué distancia ha recorrido al cabo de 5,0s?
   c Se coloca cerca del péndulo un segundo péndulo idéntico, que se suelta desde su desplazamiento lateral derecho máximo 3s después de soltar el primer péndulo. Describe la diferencia de fase entre ambos péndulos.

Condiciones del movimiento armónico simple

El tipo más simple de oscilación se produce cuando un objeto, como una masa sujeta a un muelle (Figura 4.3), se desplaza de su posición de equilibrio y experimenta la acción de una fuerza de recuperación, F, proporcional al desplazamiento y en sentido contrario a este. Bajo estas circunstancias, si la amplitud se duplica, la fuerza de recuperación se duplica también para que el objeto siga oscilando con el *mismo periodo*, aunque la amplitud haya variado. En general, una oscilación isócrona se produce cuando:

$$F \propto -x$$

El signo negativo de la expresión anterior indica que la fuerza va en sentido contrario al desplazamiento. En otras palabras, la fuerza se opone al movimiento. Esta es la razón por la que se denomina fuerza de *recuperación*.

Este tipo de oscilación se denomina **movimiento armónico simple (MAS)**. Aunque se trata de un modelo teórico, muchas oscilaciones de la vida real se aproximan bastante a este modelo ideal. El MAS se define en términos de aceleración, pero como esta es proporcional a la fuerza, la relación tiene la misma forma.

El movimiento armónico simple se define como una oscilación en la que la aceleración, a, de un cuerpo es proporcional a su desplazamiento, x, desde su posición de equilibrio y en sentido opuesto a este desplazamiento:

$$a \propto -x$$

Es decir, la aceleración siempre se dirige hacia la posición de equilibrio (tal como indica el signo negativo) o, en otras palabras, el objeto decelera a medida que se aleja de la posición de equilibrio (tal como se muestra en la Figura 4.6). La proporcionalidad se confirma en la Figura 4.6 mediante la línea recta que pasa por el origen. La gráfica fuerza-desplazamiento es similar, con un gradiente cuya magnitud equivale a la *constante de fuerza*.

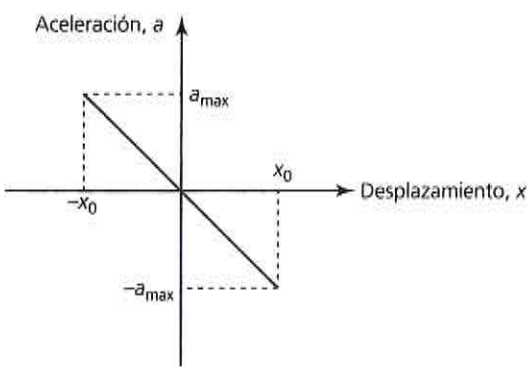


Figura 4.6 *Gráfica aceleración – desplazamiento para el MAS*

Naturaleza de la ciencia

Importancia del modelo MAS

Podemos encontrar movimientos repetitivos (oscilaciones) en muchos aspectos de nuestras vidas. El modelo de las oscilaciones armónicas simples nos puede ayudar a comprender la mayoría de estos movimientos, cuyo estudio desempeña un importante papel en la física (se tratan con más detalle en el Capítulo 9, para alumnos de Nivel Superior). En el laboratorio se pueden estudiar numerosos osciladores simples cuyo movimiento se describe adecuadamente mediante la teoría elemental, pero hay otros muchos osciladores que no encajan suficientemente con la teoría. A partir del modelo MAS se pueden construir otros modelos matemáticos avanzados, y se pueden realizar simulaciones de las oscilaciones mediante ordenador, de manera que se incluya la disipación de energía y por tanto se pueda representar la realidad de una forma más ajustada.

5 a Enumera seis elementos de tu hogar o tu escuela que puedan oscilar.
b Razona si la oscilación es isócrona para cada uno de los osciladores anteriores.

6 a ¿Crees que una masa que se mueve libremente en vertical, hacia arriba y hacia abajo, en el extremo de una goma elástica, experimenta un movimiento armónico simple?
b Razona tu respuesta.

7 Copia la Figura 4.6. Supón que la gráfica que has dibujado representa el MAS de una masa, m, que oscila verticalmente en el extremo de un muelle cuya constante de fuerza es k. Añade dos rectas a la gráfica que representen las oscilaciones de:
a una masa equivalente a $0{,}5\,m$ sobre el mismo muelle
b una masa m en el extremo del muelle cuya constante de fuerza es $0{,}5\,k$.

Gráficas del movimiento armónico simple

El uso de un sensor de recogida de datos conectado a un ordenador (como se muestra en la Figura 4.7) facilita la producción de gráficas desplazamiento-tiempo para numerosos osciladores.

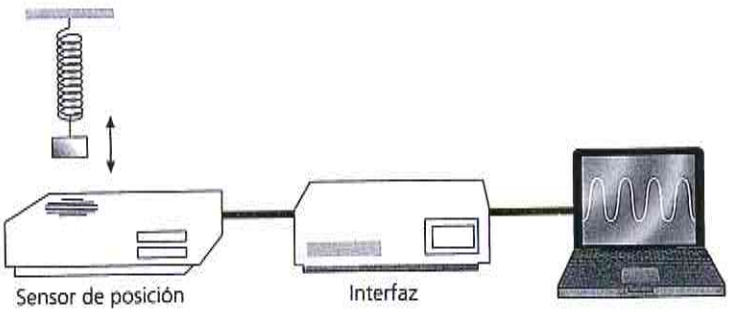


Figura 4.7 *Recogida de datos de las oscilaciones de una masa colocada en el extremo de un muelle mediante un sensor y un registrador de datos*

En la gráfica de la Figura 4.8 se representa la variación del desplazamiento, x, con el tiempo, t, según nuestro modelo ideal del movimiento armónico simple de una partícula. En este ejemplo hemos *escogido* que la partícula tenga desplazamiento cero al inicio del cuenteo de tiempo, y que su amplitud sea x_0. La curva tiene una forma **sinusoidal** (como la función seno). De la misma manera, podríamos haber escogido que la curva comenzara en el momento en que la partícula estuviera en su punto de desplazamiento máximo. En este caso la curva tendría la forma de la función coseno.

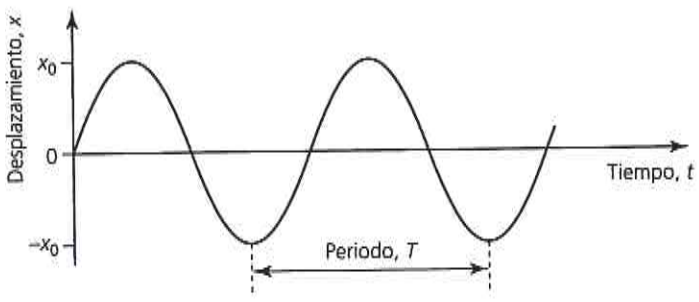


Figura 4.8 *Gráfica desplazamiento – tiempo para un movimiento armónico simple representado por una onda sinusoidal; en este caso el tiempo se ha empezado a contar cuando la partícula tenía desplazamiento cero*

La velocidad en un instante de tiempo determinado se puede determinar a partir del gradiente de la curva desplazamiento-tiempo en ese punto:

$$\text{velocidad, } v = \frac{\text{cambio en el desplazamiento}}{\text{cambio en el tiempo}} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

De forma similar, la aceleración en un instante de tiempo determinado es el gradiente de la curva velocidad – tiempo:

$$\text{aceleración, } a = \frac{\text{cambio en la velocidad}}{\text{cambio en el tiempo}} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Con esta información podemos dibujar y comparar tres gráficas del movimiento distintas aunque interconectadas, como se muestra en la Figura 4.9.

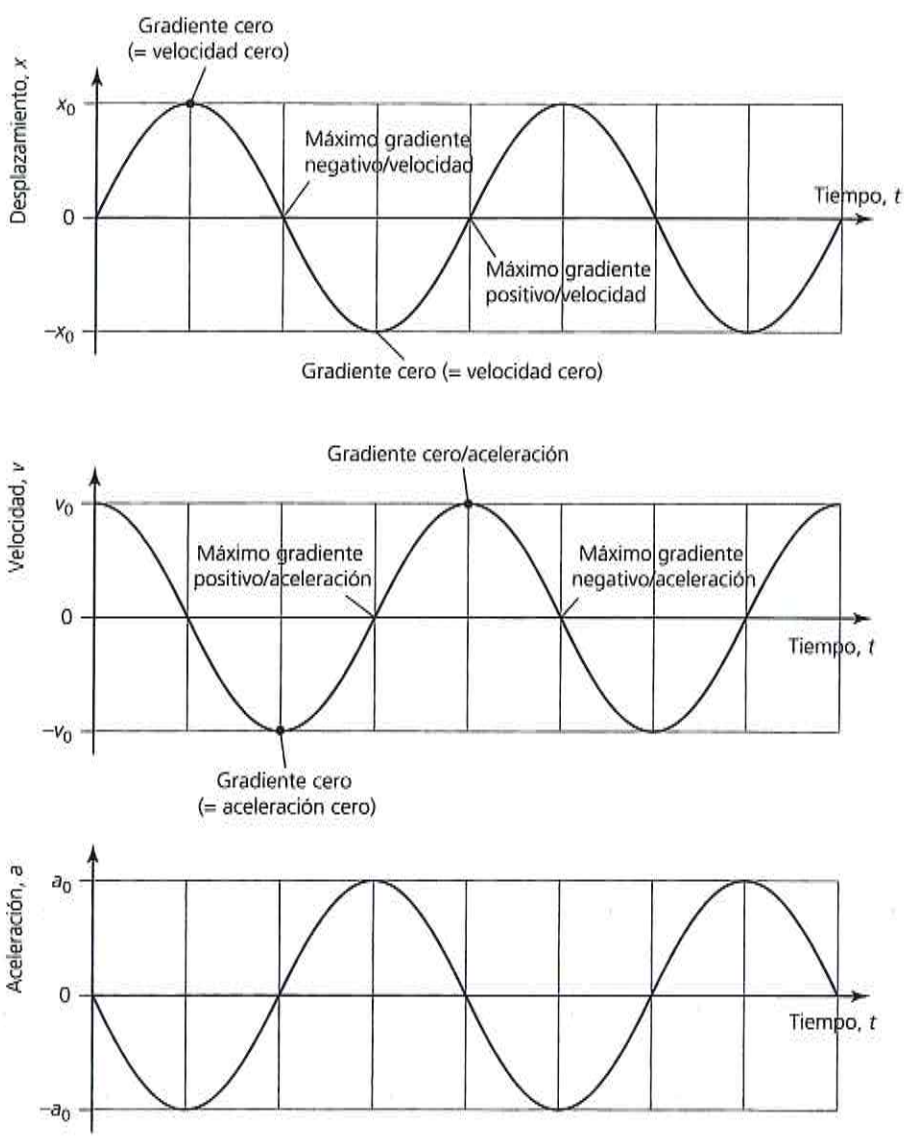
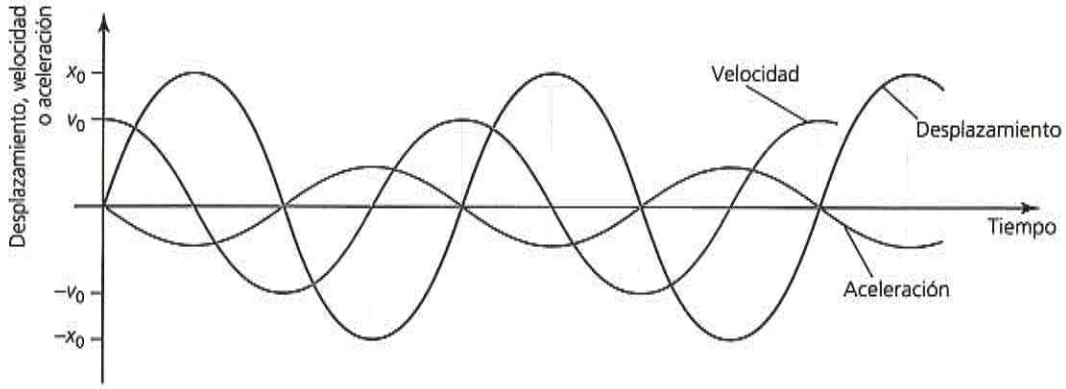


Figura 4.9
Gráficas del movimiento armónico simple cuando el desplazamiento empieza en x = 0:
a *desplazamiento – tiempo;*
b *velocidad – tiempo;*
c *aceleración – tiempo*

Podemos ver que la velocidad alcanza su valor máximo, v_0, cuando el desplazamiento x es cero y que la velocidad es cero cuando el desplazamiento está en su máximo, x_0. En otras palabras, la gráfica de la velocidad está desplazada un cuarto de fase respecto a la gráfica del desplazamiento.

A partir de la Figura 4.9 podemos ver que la aceleración tiene su valor máximo cuando la velocidad es cero y el desplazamiento es máximo. Es justo lo que cabría esperar, porque cuando el desplazamiento es máximo, la fuerza de recuperación (que actúa en sentido contrario) es también máxima. En términos de diferencia de fase, la gráfica de la aceleración está desplazada un cuarto de fase respecto a la gráfica de la velocidad, y media fase respecto a la gráfica del desplazamiento.

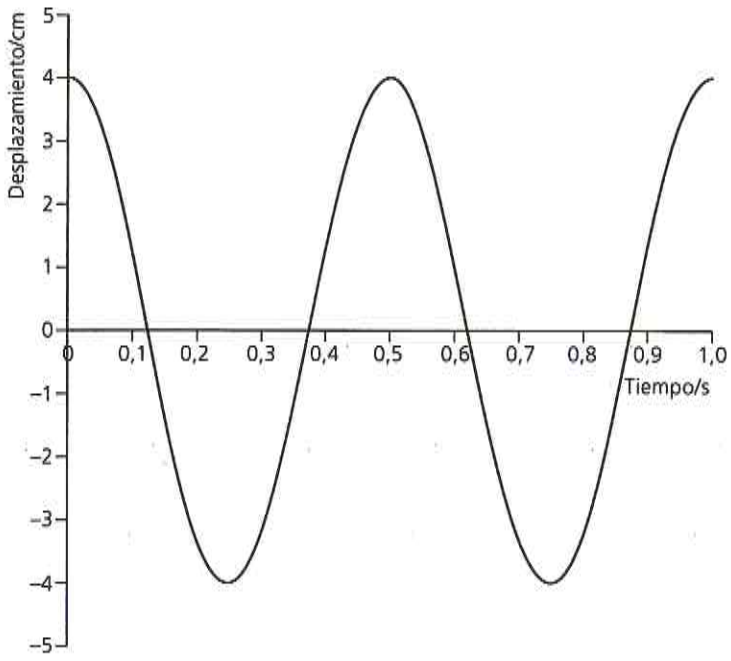
En la Figura 4.10 se representan las tres gráficas simultáneamente sobre unos mismos ejes con objeto de compararlas más fácilmente. (Observa que las amplitudes de las tres curvas son arbitrarias, ya que no están interconectadas).



■ **Figura 4.10**
Comparación de las curvas de desplazamiento, velocidad y aceleración para el MAS con el inicio del cuenteo de tiempo en el desplazamiento x = 0

Se recomienda a los alumnos que utilicen la simulación por ordenador de un objeto que oscile con MAS, combinada con las representaciones gráficas asociadas.

8 Observa la gráfica de la Figura 4.11, en la que se representa el movimiento de una masa que oscila en el extremo de un muelle. Determina:
- **a** la amplitud
- **b** el periodo
- **c** el desplazamiento al cabo de 0,15 s
- **d** el desplazamiento al cabo de 1,4 s.



■ **Figura 4.11**

9 **a** Esboza una gráfica desplazamiento-tiempo en la que se representen dos oscilaciones completas de un oscilador armónico simple, con un periodo de 2,0 s y una amplitud de 5,0 cm.
b Dibuja sobre los mismos ejes la forma de la onda de un oscilador cuya frecuencia es el doble de la anterior y con la misma amplitud.
c Dibuja sobre los mismos ejes la forma de la onda de un oscilador con una amplitud de 2,5 cm y la misma frecuencia del primer oscilador, pero que está desfasado un cuarto de fase respecto a este.

10 a Esboza una gráfica velocidad – tiempo en la que se representen dos oscilaciones completas de un oscilador armónico simple, con una frecuencia de 4 Hz y una velocidad máxima de 4,0 cm s^{-1}.
b Esboza sobre los mismos ejes la forma de onda que representa la variación de:
i el desplazamiento
ii la aceleración para la misma oscilación.
c Describe las diferencias de fase entre estas tres gráficas.

Cambios de energía durante las oscilaciones armónicas simples

Cuando desplazamos un objeto de su posición de equilibrio (ya sea empujándolo o tirando de él) en contra de la acción de una fuerza de recuperación, realizamos un trabajo y se almacena energía potencial en el oscilador. Por ejemplo, un muelle almacena energía potencial elástica y un péndulo simple almacena energía potencial gravitatoria. Cuando soltamos el objeto, gana energía cinética y pierde energía potencial a medida que la fuerza lo acelera para volver a su posición de equilibrio y, al mismo tiempo, su energía potencial es cero. Cuando se aleja de su posición de equilibrio, la energía cinética decrece a medida que la fuerza de recuperación se opone a su movimiento y la energía potencial vuelve a aumentar.

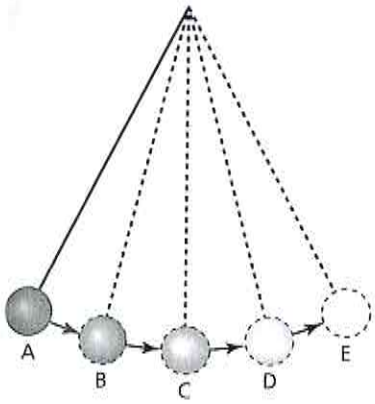


Figura 4.12
Balanceo de un péndulo simple

A modo de ejemplo consideremos la Figura 4.12, en la que se representa un péndulo que ha sido desplazado de su posición de equilibrio, C, hasta la posición A. Mientras se mantiene en la posición A, su energía cinética es cero y el cambio en la energía potencial gravitatoria (comparada con la de la posición C) es máximo. Cuando se suelta, la gravedad proporciona la fuerza de recuperación y se produce un intercambio de energía potencial en energía cinética a medida que el péndulo se desplaza de la posición B a la C. Cuando el péndulo está en C, la energía cinética es máxima y el cambio en la energía potencial se reduce a cero. A continuación el péndulo vuelve a transferir su energía cinética en energía potencial a medida que se desplaza desde la posición D a la posición E. En la posición E, como en la A, la energía cinética es cero y se produce el cambio máximo de energía potencial. El proceso se repite cada media oscilación.

Si el péndulo fuera un oscilador armónico simple perfecto no habría pérdidas de energía, de manera que la suma de la energía cinética más la energía potencial sería constante y el péndulo continuaría alcanzando la misma altura vertical y la misma velocidad máxima en cada oscilación. En la práctica, las fuerzas de fricción son la causa de la disipación de energía, de manera que todas las energías del péndulo disminuyen progresivamente.

Ejemplo resuelto

2 Un péndulo como el que se muestra en la Figura 4.12 tiene un periodo de 1,5 s.
a Esboza una gráfica donde representes la variación de la energía cinética del péndulo durante un intervalo de tiempo de 3,0 s. (Comienza desde la posición A y supón que no hay transferencia de energía hacia el entorno).
b Esboza una segunda gráfica, sobre los mismos ejes, donde representes los cambios en la energía potencial gravitatoria del péndulo.
c Añade una curva que represente la variación de la energía total.

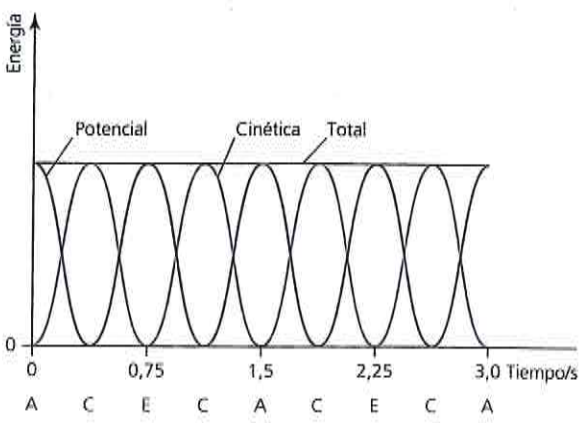


Figura 4.13

11 Describe las transferencias de energía que tienen lugar durante un único ciclo de una masa que oscila en el extremo de un muelle (véase la Figura 4.3).

12 Copia la gráfica de la energía potencial de la Figura 4.13. Añade una segunda curva que represente cómo sería la gráfica si hubiera pérdidas significativas de energía hacia el entorno.

13 Explica por qué un líquido que oscila en el interior de un tubo en forma de U solo completa un máximo de dos oscilaciones antes de que el movimiento oscilatorio se detenga.

Enlace con la teoría del conocimiento

El objetivo primordial de los modelos es la simplificación

El modelo del oscilador armónico es un paradigma de modelo en el que se utiliza una única ecuación para describir un fenómeno. ¿Cómo saben los científicos si un modelo es lo bastante exhaustivo para los requisitos que se le exigen?

¿Es suficiente responder que los científicos deberían estar satisfechos si una determinada teoría o modelo, describe completamente todas las observaciones disponibles? Si existen diferencias entre las predicciones de una teoría o modelo y las observaciones repetidas, ¿hay que mejorar el modelo o incluso reemplazarlo? ¿O bien debemos aceptar que existen situaciones tan complejas que ningún modelo las puede reproducir con exactitud?

4.2 Ondas viajeras

Se pueden estudiar muchos tipos de ondas. La característica común que comparten todas las ondas viajeras consiste en que transportan energía, pero el medio por el que viajan en general no queda perturbado de forma permanente.

Estamos familiarizados con las ondas del agua, pero existen muchos otros tipos de ondas, todas ellas con características similares. Entre ellas se encuentran muchas ondas importantes que no podemos ver. Las **ondas mecánicas**, incluido el sonido, comportan la existencia de masas que oscilan y que necesitan un medio material a través del cual viajar, pero hay ondas como las de la luz (**ondas electromagnéticas**) que también pueden viajar a través del espacio vacío.

El estudio de las ondas es sin duda una parte muy importante de la física, y podemos resumir la importancia de las ondas viajeras diciendo que pueden transferir energía de un lugar a otro sin transferir materia. Además, algunos tipos de ondas se pueden modificar para transmitir información, (para comunicar). Las ondas de sonido y las ondas de radio son los ejemplos más claros de esta aplicación

Naturaleza de la ciencia

Patrones, tendencias y discrepancias

La búsqueda de **patrones** y similitudes es uno de los principales aspectos de todas las ramas de la ciencia. Sin la existencia de patrones y tendencias, una colección de datos y observaciones desconectadas sería imposible de analizar. En la actualidad reconocemos que la luz, el sonido, las perturbaciones del agua, las cuerdas que vibran (por ejemplo en un instrumento musical) y los terremotos son todos ellos ejemplos de ondas, pero en otras épocas no era nada evidente. Hicieron falta siglos de cuidadosas observaciones para llegar a esta conclusión, que simplifica enormemente nuestro conocimiento del mundo natural. La comprensión de la teoría ondulatoria elemental nos permite aplicar nuestro conocimiento a muchas ramas distintas de la ciencia, desde el movimiento de las galaxias distantes hasta la estructura del átomo.

■ Ondas viajeras

Las ondas que transfieren energía lejos de una fuente se denominan *ondas viajeras continuas* o *ondas progresivas*.

La manera más fácil de desarrollar nuestra comprensión de *todos* los tipos de ondas viajeras es comenzando por considerar un sistema unidimensional simple (como por ejemplo la onda que se propaga a través de una cuerda mediante la sacudida continua de uno de sus extremos, como se muestra en la Figura 4.14). Las demostraciones realizadas con ondas obtenidas mediante cordeles, cuerdas o muelles largos, son particularmente útiles porque son fáciles de producir y las velocidades a las que viajan las ondas son observables.

■ **Figura 4.14** *Creación de una onda sacudiendo el extremo de una cuerda*

Consideremos el ejemplo ideal de una cuerda que es sacudida verticalmente o lateralmente por un extremo produciendo una oscilación que obedece a un MAS. Las oscilaciones pasan atravesando la cuerda, de una parte a la siguiente, con un retraso. Cada parte de la cuerda, a su vez, hace exactamente lo mismo (si no hay disipación de energía). Es decir, cada parte de la cuerda oscila con un MAS paralelo a la perturbación original. Es fácil imaginar cómo se produce la onda sinusoidal característica (como la que se muestra en la Figura 4.14). Las oscilaciones que transfieren muchos tipos distintos de ondas se pueden considerar armónicas simples.

■ **Figura 4.15**
Las olas del océano transfieren una gran cantidad de energía en Brighton (Reino Unido); sin embargo, no hay un movimiento neto continuo del agua en sí misma

Los científicos describen el movimiento de una onda lejos de su fuente como una **propagación**. El **medio** de propagación es cualquier sustancia a través de la que pasa la onda.

Es muy importante remarcar que cuando observamos una onda, a pesar de nuestra impresión de movimiento, el medio en sí *no* se mueve de forma continua en la dirección del movimiento aparente de la onda.

Las ondas viajeras transfieren energía sin transfererir materia. Por ejemplo, las olas del océano pueden «romper» y «estrellarse» contra un rompeolas (Figura 4.15), pero no hay un movimiento continuo neto de agua del mar a causa de las olas. Un bloque de madera flotando sobre el agua oscila simplemente hacia arriba y hacia abajo cuando pasan las olas (en ausencia de viento).

Si una perturbación no es continua, sino que se trata de un suceso aislado (una única oscilación), podemos describir la perturbación que se propaga como un **pulso** de ondas en lugar de una onda.

■ Ondas transversales y ondas longitudinales

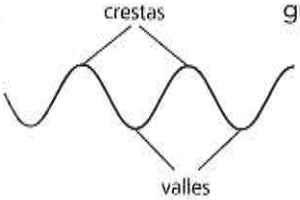
Todas las **ondas** son, o bien **transversales**, o bien **longitudinales**. En primer lugar consideraremos las ondas transversales.

Ondas transversales

Para comprender cómo pasan las ondas a través de un medio continuo, como una cuerda, es útil imaginar un modelo en el que el medio está representado por partículas separadas (discretas), tal como se muestra en la Figura 4.16. La línea de color negro representa una onda transversal que se desplaza hacia la derecha; las flechas indican de qué modo se mueven las partículas en ese momento. La segunda línea, dibujada en rojo, representa la posición de la misma onda un breve intervalo de tiempo después.

■ **Figura 4.16**
Movimiento de las partículas del medio cuando la onda transversal se desplaza hacia la derecha

Cada parte del medio hace lo mismo (oscilar con la misma frecuencia y la misma amplitud), pero las distintas partes tienen desplazamientos distintos en cada instante de tiempo. Es decir, las distintas partes del medio no se están moviendo en fase. El tipo de onda que se representa en la Figura 4.16 se denomina onda transversal.



■ **Figura 4.17**
Crestas y valles de una onda transversal

En una onda transversal, cada parte del medio oscila *perpendicularmente* a la dirección de transferencia energética de la onda.

Los «picos» de las ondas transversales (especialmente las olas) se denominan **crestas** y los «puntos bajos» se denominan **valles** (Figura 4.17).

Entre los ejemplos de ondas transversales se encuentran la luz (y todas las demás zonas del espectro electromagnético), las olas y las ondas que se generan al tensar una cuerda.

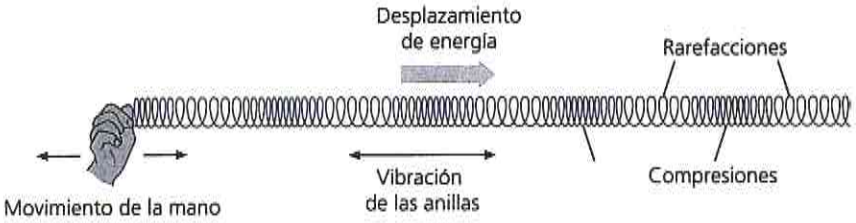
Las ondas mecánicas transversales no pueden atravesar los gases a causa de la aleatoriedad del movimiento de sus partículas.

Ondas longitudinales

En una onda longitudinal, cada parte del medio oscila *paralelamente* a la dirección de transferencia energética de la onda.

Podemos obtener ondas longitudinales mediante un muelle, pero debemos estirarlo primero para que las anillas no estén en contacto. (En las demostraciones prácticas normalmente se utilizan muelles muy «enganchados»). Para que las ondas obtenidas sean longitudinales debemos hacer oscilar el extremo del muelle «hacia delante y hacia atrás» a lo largo de la línea del muelle (idealmente con un MAS).

En la Figura 4.18 se muestra el diagrama de una onda longitudinal obtenida de forma ideal mediante un muelle con las anillas muy enganchadas. En el diagrama se marcan las **compresiones** (zonas donde el muelle es comprimido) y las **rarefacciones** (zonas donde el muelle es estirado) características. Las ondas longitudinales también se suelen denominar **ondas de compresión.**



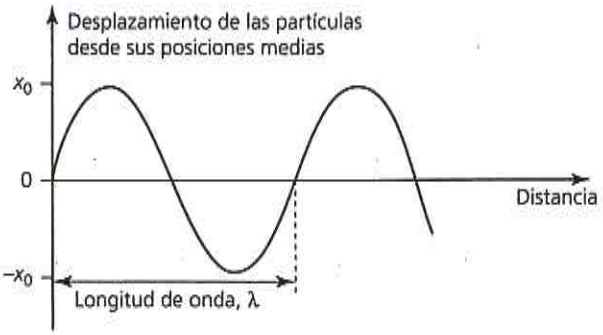
■ **Figura 4.18**
Oscilaciones de un muelle que transfiere ondas longitudinales

Igual que en el caso de las ondas transversales, cuando las ondas longitudinales transfieren energía al medio, este no experimenta ningún movimiento de traslación lejos de la fuente.

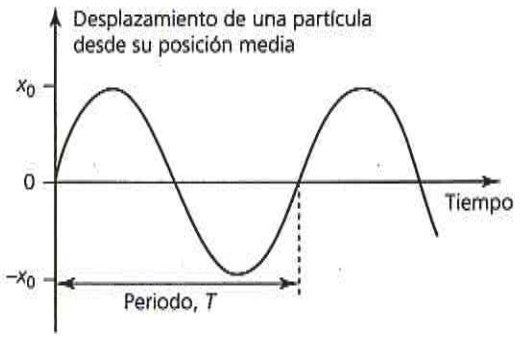
Entre los ejemplos de ondas longitudinales se encuentran las ondas del sonido y las ondas de compresión en sólidos. Los terremotos producen tanto ondas longitudinales como transversales en las rocas terrestres.

■ Representación gráfica de las ondas

Para representar ondas (ya sean longitudinales o transversales) se pueden dibujar dos gráficas de aspecto tan similar que pueden llegar a confundirse fácilmente. Se trata de las gráficas desplazamiento – distancia y desplazamiento – tiempo. Compara las Figuras 4.19 y 4.20.



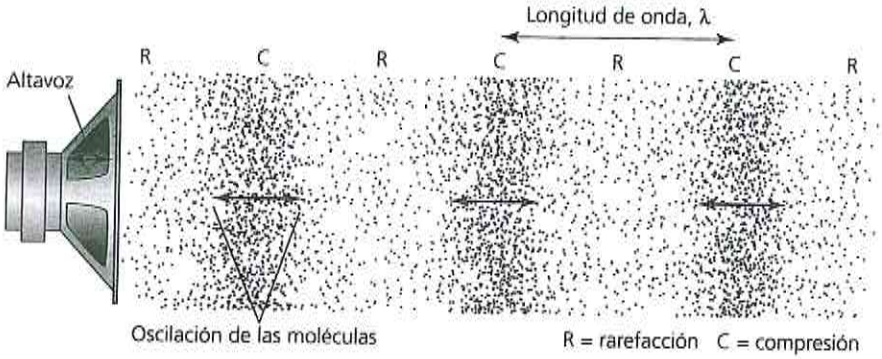
■ **Figura 4.19**
Gráfica desplazamiento – distancia para un medio determinado en la que se muestra el significado de la longitud de onda, λ



■ **Figura 4.20**
Gráfica desplazamiento – tiempo para una partícula individual en la que se muestra el significado del periodo, T

En la Figura 4.19 se representa la posición de *muchas* partes de un medio, cada una de ellas moviéndose con amplitud x_0, en un instante determinado de tiempo (una «foto»). En la Figura 4.20 se representa el movimiento de *una única* parte de un medio cuando la onda lo atraviesa. (Son similares a las gráficas de MAS que se estudiaron al principio del capítulo).

La forma de estas gráficas puede sugerir que únicamente representan ondas transversales, pero es importante destacar que el desplazamiento de las ondas longitudinales puede representarse también mediante gráficas similares. En la Figura 4.21 se muestra cómo puede cambiar la disposición aleatoria de las moléculas del aire cuando lo atraviesa una onda longitudinal de sonido. Las compresiones corresponden a zonas con una presión del aire superior a la presión media y las rarefacciones corresponden a zonas con una presión del aire inferior a la presión media.



■ **Figura 4.21**
Disposición de las moléculas de aire cuando las atraviesa el sonido

■ Longitud de onda, frecuencia, periodo y velocidad de onda

La **longitud de onda**, λ, se define como la menor distancia entre dos puntos que se mueven en fase.

La longitud de onda se puede identificar fácilmente en una gráfica desplazamiento – posición (Figura 4.19) y se suele medir en metros.

El **periodo**, T, de una onda se define como el tiempo que tarda una onda completa en pasar por un punto dado (o el tiempo que tarda en completarse una oscilación de un punto del medio).

El periodo se puede identificar fácilmente en una gráfica desplazamiento – tiempo (Figura 4.20).

La **frecuencia**, f, de una onda se define como el número de ondas que atraviesan un determinado punto por unidad de tiempo (o número de oscilaciones en un punto dentro del medio por unidad de tiempo).

La **velocidad de onda**, c, se define como la distancia recorrida por una onda en una unidad de tiempo.

Los símbolos v y c se emplean indistintamente para la velocidad de onda, pero la velocidad de las ondas electromagnéticas siempre se representa mediante el símbolo c. Todas las velocidades de onda se acostumbran a medir en $m\,s^{-1}$.

Ecuación de onda

Sabemos que, en general, la velocidad es igual a la distancia recorrida dividida por el tiempo que se ha tardado en recorrerla. Una onda recorre una distancia de una longitud de onda en un periodo T, de manera que $c = \lambda/T$.

O bien, como $T = 1/f$:

$$c = f\lambda$$

velocidad de onda = frecuencia x longitud de onda

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Se trata de una ecuación muy simple, pero su uso es muy generalizado. Se puede utilizar para todo tipo de ondas.

Es importante comprender que una vez se crea la onda, su frecuencia no puede cambiar. Por tanto, si se produce un cambio de velocidad (por ejemplo después de entrar en un medio distinto) se producirá a su vez un cambio en la longitud de onda (velocidad menor implica longitud de onda menor; velocidad mayor implica longitud de onda mayor).

■ Naturaleza de las ondas electromagnéticas

La luz viaja en forma de onda transversal y el **espectro** de la luz visible «blanca» (desde el color rojo al violeta), nos resulta familiar (Figura 4.22). Las longitudes de onda de las ondas luminosas son muy pequeñas y los distintos colores del espectro tienen a su vez distintas longitudes de onda. La luz roja tiene la longitud de onda más larga (aproximadamente 7×10^{-7} m) y la luz violeta tiene la longitud de onda más corta del espectro visible (aproximadamente 4×10^{-7} m).

■ **Figura 4.22**
Espectro de la luz visible

Pero la luz visible es solo una pequeña parte de un grupo de ondas mucho mayor, denominado **espectro electromagnético** (cuyas principales secciones se enumeran en la Tabla 4.1). Es importante comprender que el espectro es *continuo* y que a menudo no hay una frontera definida entre una determinada zona del espectro y la siguiente, ya que las zonas se pueden superponer. Por ejemplo, los rayos gamma procedentes de una fuente radioactiva pueden ser idénticos a los rayos X procedentes de un tubo de rayos X.

Estamos rodeados en todo momento por muchas de estas ondas, que provienen de numerosas fuentes distintas. El término «luz» es simplemente el nombre que damos los seres humanos a estas ondas electromagnéticas que podemos detectar con nuestros ojos. La única diferencia fundamental entre los diversos tipos de ondas electromagnéticas es su longitud de onda, de modo que no debería sorprendernos que, bajo las circunstancias apropiadas, todas estas ondas transversales exhiban las mismas propiedades ondulatorias fundamentales.

Todas las ondas electromagnéticas pueden viajar a través del espacio vacío exactamente con la misma velocidad, $c = 3{,}00 \times 10^8\,m\,s^{-1}$.

Esta constante figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Las ondas electromagnéticas no *necesitan* viajar a través de un medio, pero cuando atraviesan otros materiales, sus velocidades son menores que en el vacío (aunque su velocidad en el aire es casi idéntica a su velocidad en el vacío).

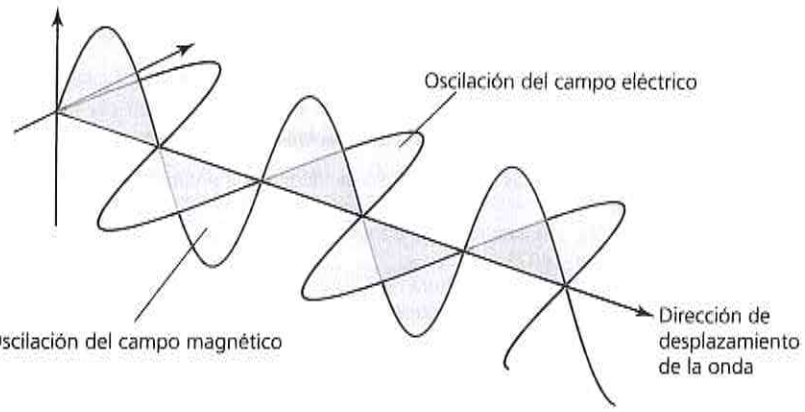
En la Tabla 4.1 se proporciona un breve resumen de las principales zonas del espectro electromagnético. Las ondas con longitudes de onda inferiores a unos 10^{-8} m pueden ser dañinas para el cuerpo humano, incluso a intensidades bajas.

■ **Tabla 4.1**
Las distintas zonas del espectro electromagnético

Nombre	Longitud de onda típica	Origen	Algunos usos habituales
ondas de radio	10^2 m	circuitos electrónicos/antenas	comunicaciones, radio, TV
microondas	10^{-2} m	circuitos electrónicos/antenas	comunicaciones, teléfonos móviles, hornos, radar
infrarrojo (IR)	10^{-5} m	todos los objetos emiten infrarrojos pero los más calientes emiten muchos más IR que los más fríos	láseres, calefacción, cocina, tratamientos médicos, controles remotos
luz visible	5×10^{-7} m	objetos muy calientes, bombillas, el Sol	visión, iluminación, láseres
ultravioleta (UV)	10^{-8} m	el Sol, lámparas UV	fluorescencia
rayos X	10^{-11} m	tubos de rayos X	diagnóstico y tratamiento médico, estudio de la estructura de la materia
rayos gamma	10^{-13} m	materiales radioactivos	diagnóstico y tratamiento médico, esterilización de utensilios de uso médico

El intervalo que recorren las distintas longitudes de onda, que va desde menos de 10^{-14} m hasta 10^4 m, es enorme y es importante recordar un orden de magnitud para las principales radiaciones.

La naturaleza exacta de estas ondas constituyó un verdadero rompecabezas científico durante mucho tiempo, porque todos los demás tipos de ondas requieren un medio por el que desplazarse, mientras que las ondas electromagnéticas pueden transferir energía a través del espacio vacío. Actualmente sabemos que estas ondas transversales no están producidas por la oscilación de un medio, sino que están ligadas a la oscilación de campos eléctricos y magnéticos (que no requieren un medio), tal como se muestra en la Figura 4.23; de aquí el nombre de ondas *electromagnéticas*. Sin embargo, estas ondas también poseen algunas propiedades que solo se pueden explicar si las consideramos «partículas» (y no ondas) a las que denominamos **fotones**. Cada fotón transfiere una cantidad individual de energía que depende de su frecuencia. Estas ideas ya no se necesitan aquí y se tratan con más detalle en los apartados 7.3 y 12.1.



■ **Figura 4.23**
Las ondas electromagnéticas son la combinación de campos eléctricos y campos magnéticos

En la Tabla 4.1 no se incluyen los medios de detección de las diversas radiaciones electromagnéticas. La detección y la absorción de las radiaciones electromagnéticas invisibles procedentes de diversas zonas del espectro, así como el estudio de su origen, las hace más «reales».

Existen dos aplicaciones de las ondas electromagnéticas que merece la pena mencionar:

- Las microondas y las ondas de radio se pueden generar con facilidad y se pueden detectar mediante corrientes oscilatorias en los circuitos eléctricos. Las propiedades de estas ondas se pueden modificar para que transporten información (comuniquen) muy rápidamente a larga distancia.

■ **Figura 4.24**
Utilización de las ondas electromagnéticas para las comunicaciones nacionales e internacionales

- El análisis de los espectros de emisión de los gases excitados energéticamente proporciona información sobre los niveles energéticos en el interior de los átomos.

Ejemplo resuelto

3 Las crestas de las olas que llegan a un puerto están separadas 2,1 m y tienen una amplitud de 60 cm. Un observador inmóvil ve pasar diez olas cada minuto.
a ¿Cuál es la frecuencia de las olas?
b ¿Cuál es su velocidad?

a $T = \frac{60}{10} = 6{,}0\,\text{s}$
Así $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{6{,}0} = 0{,}17\,\text{Hz}$

b $v = f\lambda$
$v = 0{,}17 \times 2{,}1 = 0{,}36\,\text{m s}^{-1}$

14 a Calcula la longitud de onda en el aire de un sonido muy agudo de frecuencia 2,20 kHz. (Velocidad del sonido en el aire = 340 $m s^{-1}$)
   b Cuando el mismo sonido atraviesa un metal, su longitud de onda aumenta hasta 2,05 m. ¿Cuál es la velocidad del sonido en el metal?
   c Sugiere un motivo por el que el sonido viaja más rápido a través de los sólidos que a través de los gases (como el aire).

15 a ¿Qué frecuencia tienen las ondas de radio de longitud de onda 560 m? (Velocidad de las ondas electromagnéticas = $3,0 \times 10^8 m s^{-1}$)
   b ¿Cuánto tarda una señal de radio en viajar desde:
      i Delhi a Mumbai (1407 km)
      ii un satélite que orbita a una altura de 33 000 km respecto a la superficie terrestre
      iii la Tierra a Marte? (Consulta en Internet cuál es la distancia máxima y la distancia mínima entre estos dos planetas.)

16 a ¿Cuál es la frecuencia (en MHz) de un rayo gamma que tiene una longitud de onda de $4,4 \times 10^{-12}$ m?
   b Sugiere un posible motivo por el que la radiación electromagnética de alta frecuencia es más peligrosa para los seres humanos que la de baja frecuencia.

17 a Calcula la longitud de onda de la luz visible de frecuencia $5,5 \times 10^{14}$ Hz.
   b Sugiere de qué color puede ser esta luz.
   c Parte de la radiación solar tiene una longitud de onda de $6,0 \times 10^{-8}$ m. ¿En qué zona del espectro electromagnético se encuentra esta radiación?

18 La separación total entre cinco crestas de ola en un tanque de oleaje es 5,6 cm. Si las olas están generadas por un vibrador que tiene una frecuencia de 12 Hz, ¿cuánto tardan las olas en recorrer una distancia de 60 cm?

19 Mientras lees estas líneas, ¿qué ondas electromagnéticas hay en la habitación?

Enlace con la teoría del conocimiento

Explicar lo invisible

Los científicos suelen trasladar su percepción de los conceptos tangibles y visibles para explicar conceptos similares invisibles, como ocurre en la teoría ondulatoria. ¿Cómo explican los científicos conceptos que no poseen ni propiedades tangibles ni propiedades visibles?

Las ondas electromagnéticas invisibles no pueden ser observadas directamente, pero se las considera ondas porque, de algún modo, se comportan igual que las ondas que podemos ver (como las ondas de las cuerdas o del agua). Sin embargo, eso no quiere decir que los científicos crean que la descripción ondulatoria de la luz (por ejemplo) sea una descripción adecuada o completa. No hay por qué esperar que las cosas que no podemos observar directamente se comporten del mismo modo que las cosas que sí podemos observar. Algunas de las propiedades de la radiación electromagnética no se pueden explicar mediante la teoría ondulatoria y hay que recurrir a una explicación mediante la teoría de partículas (fotones).

Tampoco podemos ver el sonido pero, ¿significa esto que, como en el caso de la luz, la descripción ondulatoria del sonido es solo una teoría provisional que resulta útil en determinadas ocasiones? Es decir, ¿se pueden explicar la totalidad de las propiedades del sonido mediante la teoría ondulatoria?

Perspectivas adicionales

Heinrich Hertz

■ **Figura 4.25**
Heinrich Hertz

La unidad para la frecuencia de una onda recibe su nombre en honor al físico alemán Heinrich Hertz. En 1886 realizó su descubrimiento más famoso, que consistió en comprobar experimentalmente por primera vez que las ondas electromagnéticas (ondas de radio) se podían producir, transmitir y detectar en cualquier lugar. Aunque la distancia alcanzada era muy pequeña, se puede decir que fue el inicio de las modernas comunicaciones inalámbricas. Fueron otros científicos (como Guglielmo Marconi) quienes desarrollaron las técnicas para la transmisión de las ondas a lo largo de distancias cada vez mayores y la posterior modificación de la amplitud, la frecuencia y la fase de las ondas de radio para transportar información (por ejemplo, la voz).

Se le atribuye a Hertz haber dicho que su descubrimiento «no tenía ninguna utilidad», y no era el único que expresaba esa opinión en aquella época. La historia de la ciencia está plagada de afirmaciones y predicciones que más adelante resultan ser incorrectas. En muchas ocasiones la importancia de los descubrimientos y de los inventos solo puede ser comprendida muchos años después. Este es uno de los motivos por los que la mayoría de científicos piensan que sería estúpido limitar la investigación a aquellos proyectos que tienen una aplicación evidente, inmediata y útil.

Desgraciadamente, Hertz contrajo una enfermedad mortal y falleció a los 36 años de edad cuando habían pasado menos de seis años desde su descubrimiento y mucho tiempo antes de que las repercusiones de su investigación hubieran quedado claras.

1 La investigación científica actual puede ser muy cara. ¿Crees que los países deberían ser lo bastante sabios como para gastar su dinero en otros proyectos (por ejemplo, en mejorar la asistencia médica generalizada) a menos que el objeto de estudio conduzca claramente a un objetivo claro y útil?

Naturaleza de las ondas de sonido

Cuando la superficie de un sólido vibra, perturba el aire (u otro medio) que le rodea y produce una serie de compresiones y rarefacciones (variaciones de la presión) que viajan a través de la superficie en forma de ondas longitudinales. Si estas ondas tienen una frecuencia detectable por nuestros oídos se dice que son ondas de sonido. En la Figura 4.21 se representa la producción de ondas de sonido en el aire mediante un altavoz.

El intervalo normal de audición para los seres humanos, denominado espectro audible, está aproximadamente entre 20 Hz y 20 kHz. Las frecuencias más altas se denominan ultrasonidos.

El sonido es una onda mecánica que se transmite mediante la oscilación de moléculas, y, como tal, necesita claramente un medio de propagación. El sonido no puede viajar a través del vacío. La comprensión de la naturaleza de las ondas del sonido nos lleva a esperar que viajen mejor a través de materiales en los que las moléculas están muy juntas y hay fuerzas muy intensas entre ellas. Las ondas de sonido viajan mejor a través de líquidos que a través de gases/aire, e incluso mejor a través de sólidos.

Velocidad del sonido

Como la velocidad = distancia/tiempo, para determinar la velocidad del sonido es necesario medir el tiempo que tarda en recorrer una distancia conocida. La velocidad del sonido es elevada, por tanto, para obtener buenos resultados, suele ser necesario utilizar distancias grandes y medir intervalos cortos de tiempo de forma exacta y precisa. Se pueden emplear cronómetros manuales, pero es improbable obtener buenos resultados porque siempre existen los problemas asociados a los tiempos de reacción humanos. A veces, el experimento se realiza en grandes superficies exteriores aisladas que reflejan las ondas de sonido, pero para escuchar un eco claramente (separado del sonido original), hace falta que la superficie esté al menos a 50 m de distancia.

En la Figura 4.26 se muestra el principio de un experimento a pequeña escala que se puede llevar a cabo con exactitud en un laboratorio. En la posición A se sitúa una fuente de sonido claro y breve. Cuando la onda de sonido llega al micrófono 1, la señal del micrófono viaja por el conector e indica al temporizador que inicie el cuenteo de tiempo. Cuando la onda llega al micrófono 2, la señal que viaja por el conector indica al temporizador que detenga el cuenteo de tiempo.

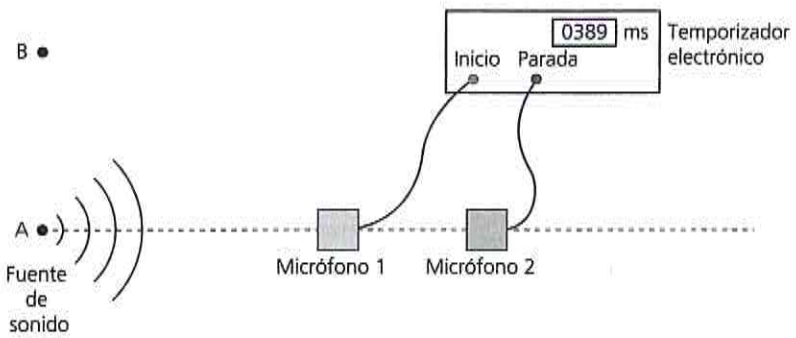


Figura 4.26 *Experimento de laboratorio para determinar la velocidad del sonido*

Ejemplo resuelto

4 Considera el experimento que se representa en la Figura 4.26.

a i Sugiere cómo se puede producir un sonido «claro y breve».

ii ¿Por qué se prefiere este tipo de sonido para el experimento?

b ¿En qué consisten los «problemas asociados a los tiempos de reacción humanos» cuando se utilizan cronómetros manuales para medir intervalos cortos de tiempo?

c Cuando los micrófonos están separados 1,35 m, el tiempo que indica el temporizador es 389 ms. Calcula el valor de la velocidad del sonido en el laboratorio.

d ¿Es necesario que los cables que conectan los micrófonos con el temporizador tengan la misma longitud? Razona la respuesta.

e ¿En qué afectaría a los resultados el hecho de situar la fuente de sonido en B, en lugar de en A?

f Si el sonido se produce golpeando la mesa del laboratorio, explica por qué el tiempo que muestra el temporizador es mucho menor.

a i Por ejemplo, golpeando un soporte para pinzas con un pequeño martillo.
ii Se necesita un sonido claro (con el volumen suficiente) y breve para que los micrófonos puedan enviar señales claras al temporizador.

b El tiempo que transcurre entre que se observa el suceso y se enciende el cronómetro es similar en magnitud al tiempo que se está midiendo. Esto significa que el porcentaje de incertidumbre es elevado. Además, los tiempos de reacción son desconocidos y variables.

c $c = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

$c = \frac{1{,}35}{0{,}389} = 347\,\text{m s}^{-1}$

d No, porque la velocidad de las señales a través de los conectores (aproximadamente la velocidad de las ondas electromagnéticas en el aire) es *mucho* más rápida que la velocidad del sonido que se está determinando.

e Se observaría una pequeña diferencia en el tiempo medido, lo que produciría una sobreestimación de la velocidad del sonido (a menos que se tuviera en cuenta el cambio de geometría para la realización de los cálculos).

f En este caso la onda de sonido viaja a través de la mesa de laboratorio a una velocidad mayor que la que tiene en el aire. Puede ser un método para determinar la velocidad del sonido en algunos sólidos.

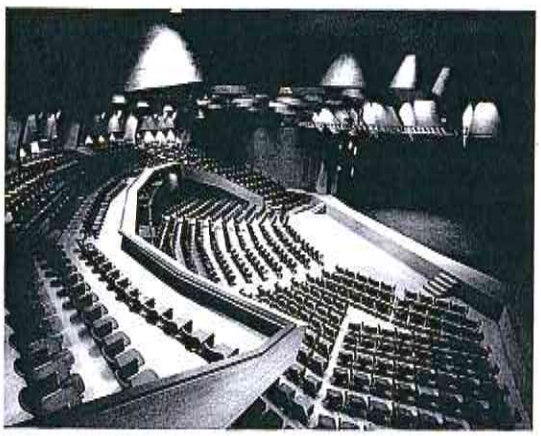
La velocidad del sonido en un gas depende de la velocidad media de las moléculas del ga Varía con la temperatura porque, en promedio, las moléculas del gas se mueven más rápido cuar to mayor es esta. A una misma temperatura, la velocidad del sonido será mayor en gases cuy moléculas tienen masas menores y, por tanto, velocidades moleculares medias elevadas (como hidrógeno, por ejemplo). Además de los experimentos para determinar la velocidad del sonido e distintos medios, se pueden diseñar experimentos para estudiar la velocidad del sonido en un ga en función del tipo de gas, la frecuencia del sonido y la temperatura.

Aplicaciones

Reflexión del sonido en salas grandes

El sonido se refleja bien sobre superficies duras, como las paredes, mientras que las superficies blandas, como las de las cortinas, alfombras, cojines y vestidos, tienden a absorberlo. El sonido que llega a nuestros oídos puede ser muy distinto del emitido por la fuente a causa de las numerosas reflexiones que puede haber experimentado. Por eso, cantar en la ducha suena muy distinto a cantar en el exterior o en una habitación amueblada.

En una sala grande diseñada para escuchar música (como un auditorio, Figura 4.27), el sonido recorre un largo camino antes de reflejarse. La reflexión es la principal causa de la absorción de las ondas de sonido y, por ello, en una sala grande un sonido determinado tarda más tiempo en caer a un nivel que ya no es audible. Este efecto se denomina *reverberación*. Los largos tiempos de reverberación de las salas grandes comportan que el oyente puede seguir escuchando la reverberación de un sonido anterior al mismo tiempo que recibe un sonido nuevo. Es decir, existe un cierto «solapamiento» de sonidos.



■ **Figura 4.27**
Un gran auditorio diseñado para una transmisión efectiva del sonido

Cuando se graba música en un estudio hay que tener en cuenta las reflexiones del sonido sobre las paredes, el suelo y el techo, aunque algunos de estos efectos se pueden añadir o eliminar electrónicamente una vez se ha grabado el sonido.

1 Sugiere por qué las superficies blandas absorben bien el sonido.

2 Los ingenieros acústicos, que son los responsables de la calidad de sonido en un auditorio, ¿prefieren obtener tiempos de reverberación cortos o largos? ¿Cómo se puede modificar el tiempo de reverberación de un sonido?

3 Averigua qué son las cámaras anecoicas y para qué se utilizan.

20 La velocidad del sonido en aire a una temperatura de 20 °C es 343 $m s^{-1}$.
   a Calcula cuánto tarda el sonido en reflejarse desde una pared que se encuentra a 50 m.
   b Estima el porcentaje de incertidumbre si este tiempo se midiera con un cronómetro de mano.

21 a Describe un experimento realizado en el exterior para determinar la velocidad del sonido en el aire en el que se empleen cronómetros manuales para medir el tiempo.
   b Enumera dos motivos por los que este experimento no se puede llevar a cabo en el interior de un edificio.

22 Explica por qué las moléculas de hidrógeno tienen una mayor velocidad media que las moléculas de oxígeno a la misma temperatura.

23 Considera el Ejemplo resuelto 4. Utiliza Internet para averiguar la temperatura aproximada del laboratorio.

24 La velocidad del sonido en el agua de mar es 1540 $m s^{-1}$ y la velocidad en agua destilada a la misma temperatura es 1490 $m s^{-1}$.
   a Sugiere un motivo para esta diferencia de velocidades.
   b Las ballenas se pueden comunicar entre sí a una distancia de unos 100 km. ¿Cuánto tarda el sonido en atravesar esta distancia?
   c Se cree que hace siglos las ballenas se podían comunicar a través de distancias mucho mayores. Sugiere una razón para ello.
   d Existe un determinado tipo de ballenas que «canta» a una frecuencia de 50 Hz. ¿A qué longitud de onda corresponde?

25 Los aparatos de escáner mediante ultrasonidos se utilizan ampliamente en los hospitales para el diagnóstico de enfermedades. Para penetrar y examinar distintas partes del cuerpo se necesitan distintas longitudes de onda y se producen imágenes de diversa nitidez. Si la velocidad de una onda ultrasónica en el músculo es 1580 $m s^{-1}$, ¿qué frecuencia se necesita para producir una longitud de onda de 0,50 mm?

4.3 Características de las ondas

Todas las ondas se pueden describir mediante los mismos conjuntos de ideas matemáticas. Si conocemos con detalle lo que ocurre en una determinada zona, tenemos la posibilidad de predecir lo que sucederá en otra

Ondas bidimensionales

Hasta ahora hemos estudiado ondas en un medio unidimensional, como una cuerda, y debemos ampliar nuestro conocimiento considerando ondas que viajan en dos dimensiones. Puede ser útil pensar en primer lugar en las olas generadas en la superficie del agua, que a todos nos resultan familiares (Figura 4.28). Para observar el comportamiento de las olas, en los laboratorios se suelen utilizar las pequeñas olas (rizos) generadas en tanques de agua con poca profundidad. En la Figura 4.29 se representa uno de estos tanques de oleaje.

Para crear olas en una superficie plana de agua debemos perturbar el agua de algún modo, por ejemplo introduciendo y sacando repetidamente un dedo (o un palo) del agua. Las olas del océano están producidas principalmente por el viento. Cada región del agua afecta al agua que la rodea, de manera que la oscilación atraviesa la fuente y se aleja de ella, con un tiempo de retraso. Las olas de un tanque de oleaje se pueden generar de manera continua mediante un motor que hace vibrar un pequeño cucharón o mango suspendido en la superficie del agua.

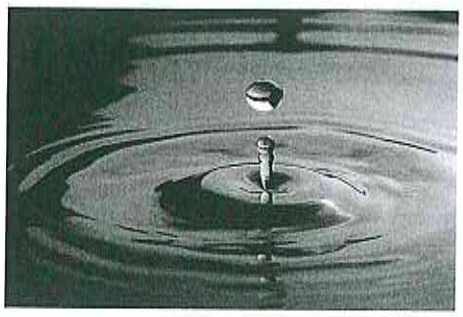


Figura 4.28
Olas circulares propagándose en un estanque

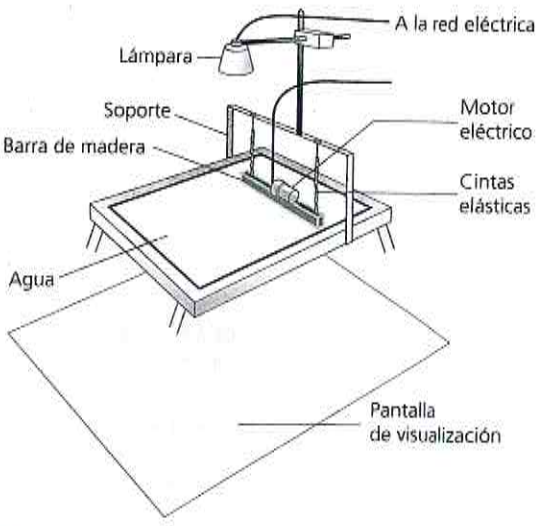


Figura 4.29
Un tanque de oleaje utilizado para estudiar el comportamiento de las olas

Frentes de onda y rayos

Cuando observamos ondas, habitualmente concentramos nuestra atención en las crestas. En cambio, si observamos desde arriba las ondas que se propagan a través de una superficie plana de agua, vemos que lo hacen en forma de círculos con igual velocidad en todas las direcciones.

Aunque las ondas viajeras se desplazan, a veces lo que nos interesa es representar su forma (y no su movimiento) en el papel o en una pantalla. Si dibujamos la posición momentánea de una onda en movimiento, las líneas que dibujamos se denominan **frentes de onda**. Un frente de onda es una línea que une los puntos adyacentes que se mueven en fase (por ejemplo una línea que une puntos donde hay crestas o donde hay valles). La distancia entre frentes de onda adyacentes es una *longitud de onda*.

En la Figura 4.30 se muestran los frentes de onda circulares que se propagan desde una fuente puntual. Las líneas que apuntan en las direcciones hacia donde se produce la transferencia de energía de la onda se denominan **rayos**. Un rayo siempre es perpendicular a los frentes de onda que representa. El movimiento del frente de ondas circular se representa mediante rayos radiales que se propagan desde una fuente puntual, como se muestra en la Figura 4.30.

En la Figura 4.31 se representan las ondas que podrían provenir de la oscilación de una varilla en una superficie de agua. Los frentes de onda como los de esta figura, paralelos entre sí, se denominan **frentes de onda planos**. El movimiento de los frentes de onda planos se representa mediante rayos *paralelos*.

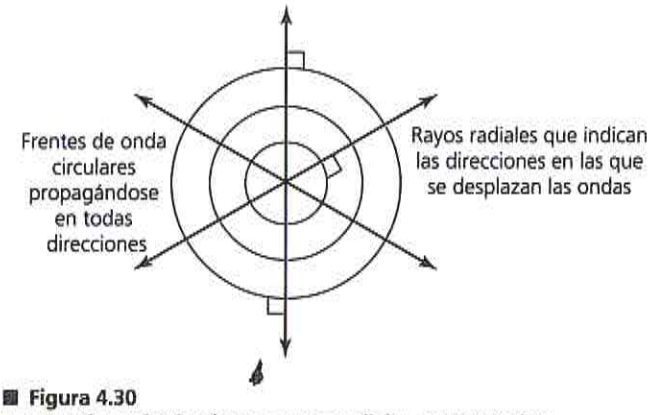


Figura 4.30
Frentes de onda circulares y rayos radiales propagándose desde una fuente puntual

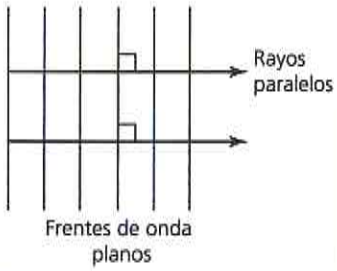


Figura 4.31
Frentes de onda planos y rayos paralelos que no se están propagando

Cuando los frentes de ondas circulares recorren un largo camino desde la fuente, empiezan a ser cada vez más paralelos y acaban siendo prácticamente frentes de ondas planos. Las ondas luminosas constituyen un importante ejemplo de este fenómeno, dado que provienen del Sol, una fuente muy lejana. Los frentes de onda procedentes del Sol se suelen considerar planos.

Hasta ahora hemos descrito los frentes de ondas en términos de ondas bidimensionales sobre superficies de agua, pero podemos emplear ideas y terminología análogas para describir *todas* las ondas en dos o en tres dimensiones. Las simulaciones por ordenador pueden resultar especialmente útiles para la representación de ondas que se propagan en tres dimensiones.

Enlace con la teoría del conocimiento

¿Es la física «más simple» que otras áreas del conocimiento?

Los frentes de onda y los rayos son visualizaciones que nos ayudan en la comprensión de la realidad, algo que las ciencias físicas hacen de forma característica mediante el establecimiento de modelos. ¿En qué se diferencia la metodología empleada por las ciencias naturales de la empleada por las ciencias humanas?

Denominamos **ciencias humanas** al estudio de la totalidad de aspectos que abarca la interacción entre los seres humanos y la interacción de estos con el mundo que les rodea. El propósito de las ciencias humanas es el mismo que el de las ciencias naturales, la búsqueda de la objetividad y de la verdad, pero la **metodología** suele ser necesariamente distinta. Los modelos visuales simples (como el frente de ondas) y los modelos matemáticos (como la ecuación de onda), que desempeñan un papel tan importante en el estudio de la física, no son fácilmente aplicables a la complejidad de la existencia humana. Además, las ciencias **empíricas** se basan en la experimentación repetida y controlada, algo que a menudo resulta inapropiado en las ciencias humanas.

Amplitud e intensidad

La cantidad de energía asociada a una onda está relacionada con su amplitud. Las ondas con amplitudes mayores transfieren más energía. Las circunferencias de los frentes de onda circulares se hacen mayores a medida que se desplazan desde una fuente puntual, de manera que una misma cantidad de energía se tiene que propagar a lo largo de una longitud mayor. Como consecuencia, la amplitud de la onda disminuye (véanse Figuras 4.28 y 4.32). Este fenómeno también ocurre en el caso de frentes de onda esféricos que se propagan en tres dimensiones, como la propagación de la luz, el sonido o las ondas de radio.

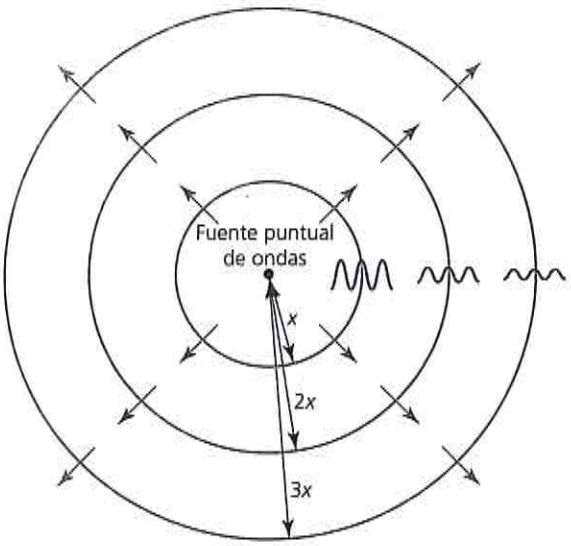


Figura 4.32
La amplitud de los frentes de onda circulares disminuye conforme aumenta la distancia a la fuente

Llegados a este punto resulta útil introducir el concepto de **intensidad** de una onda:

La intensidad, I, se define como la potencia transmitida perpendicularmente por la onda por unidad de superficie.

$$\text{intensidad, } I, = \frac{\text{potencia}}{\text{superficie}}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física* (para el Tema 8).

La unidad para la intensidad es $W\,m^{-2}$.

La intensidad de la onda disminuye claramente a medida que aumenta la distancia a la que se encuentra la fuente puntual y debe estar asociada a la amplitud de la onda.

En general la intensidad de una onda es proporcional a su amplitud al cuadrado:

$$I \propto A^2$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. Observa que estamos utilizando el símbolo A como símbolo generalizado para la amplitud (en lugar de x_0).

Ejemplos resueltos

5 La intensidad de onda que llega a una determinada ubicación de la superficie terrestre en un día soleado puede ser en promedio de unos $600\,W\,m^{-2}$.
- **a** Calcula la potencia media que incide perpendicularmente sobre un panel solar cuya superficie es $1{,}50\,m^2$.
- **b** ¿Cuánta energía puede incidir sobre el panel en seis horas?
- **c** Discute cómo puede variar la intensidad incidente sobre el panel si lo desplazamos hasta una montaña cercana.

a potencia, P, = intensidad × superficie = 600 × 1,5 = 900 W

b energía = Pt = 900 × 6 × 3600 = 19,4 MJ

c El cambio en la distancia entre el panel solar y el Sol es totalmente insignificante, pero si el panel está en lo alto de una montaña, tendrá menos atmósfera terrestre sobre él y, en consecuencia, probablemente recibirá una mayor intensidad incidente.

6 Las olas oceánicas que llegan a una playa tienen una amplitud de 2,0 m y una potencia media de $5{,}2 \times 10^4$ W por cada metro de su longitud.
- **a** Estima qué potencia por metro transferirían si su amplitud se redujera a 1,3 m.
- **b** ¿Qué amplitud produciría una potencia total de 10 MW que llegara a una playa de longitud 1,0 km?
- **c** ¿De dónde obtienen su energía las ondas oceánicas?

a $\frac{I}{A^2}$ = constante

$$\frac{(5{,}2 \times 10^4)}{2{,}0^2} = \frac{I}{1{,}3^2}$$

$I = 2{,}2 \times 10^4$ W

b $10\,MW\,km^{-1}$ es igual a $\frac{1,0 \times 10^7}{10^3} = 1,0 \times 10^4\,W\,m^{-1}$

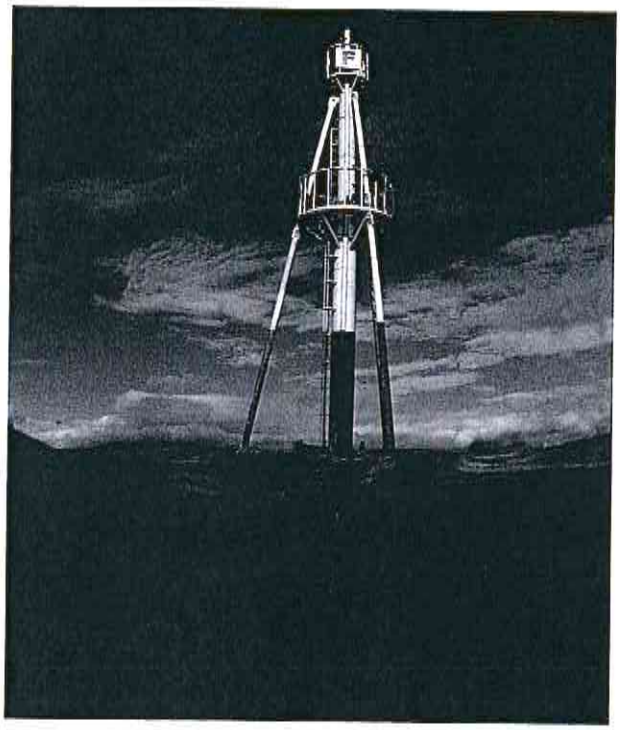
$\frac{I}{A^2}$ = constante

$\frac{5,2 \times 10^4}{2,0^2} = \frac{1,0 \times 10^4}{A^2}$

$A = 0,88\,m$

c Del viento, que a su vez la obtiene del Sol.

Las olas oceánicas transfieren una enorme cantidad de energía. La tecnología para transformar esta energía en electricidad útil es complicada y cara, aunque se está investigando mucho para desarrollarla. En la Figura 4.33 podemos ver una enorme boya que flota en el agua y que genera energía cuando la atraviesan las olas. La energía obtenida es transportada a tierra firme mediante un cable subterráneo. Este tipo de tecnología se utilizará en el generador de energía undimotriz (energía procedente de las olas del mar) más grande del mundo (62,5 MW), que se construirá en la costa oceánica de Victoria, Australia.



■ **Figura 4.33**
Generador de energía undimotriz

Ley del inverso del cuadrado de la distancia

La intensidad, I, de una onda que se desplaza desde una fuente puntual uniformemente en tres dimensiones, sin pérdida de energía, es inversamente proporcional a la distancia respecto a la fuente, x, al cuadrado.

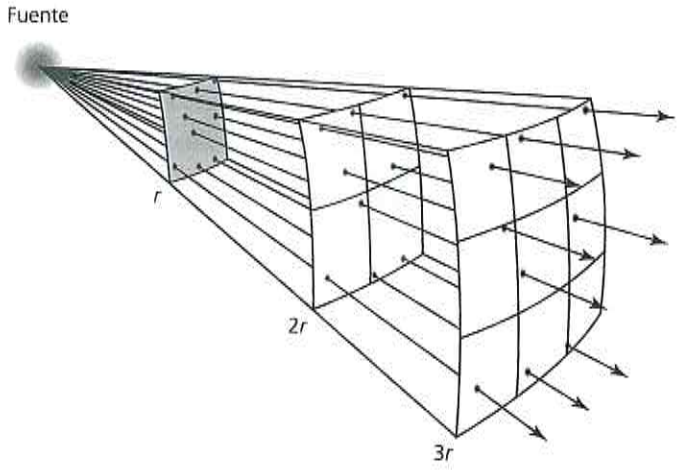
$$I \propto \frac{1}{x^2}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

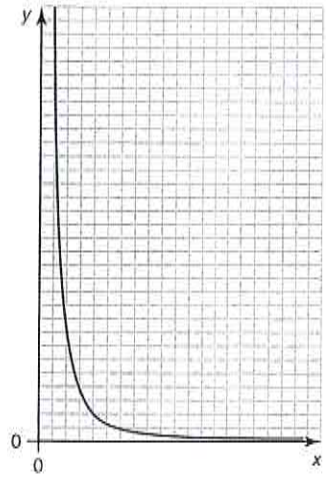
De forma alternativa podemos escribir Ix^2 = constante para ondas que se propagan desde una fuente dada.

Las relaciones que van con el inverso del cuadrado desempeñan un importante papel en física. Como ocurre con las ondas, un campo de fuerza (por ejemplo, la gravedad) que se propaga uniformemente en todas direcciones desde un punto, obedece una ley del inverso del cuadrado de la distancia.

Consideremos la luz irradiada por una fuente puntual en el caso de que no haya absorción (véase Figura 4.34). Cuanto más nos alejamos de la fuente mayor es la superficie que debe cubrir la luz y por tanto esta se vuelve más tenue. La cantidad de luz que incide sobre cada unidad de superficie disminuye con el cuadrado de la distancia. Esto es así porque cuando nos alejamos el doble de la distancia a la fuente, la luz tiene que difundirse para cubrir cuatro veces la superficie; cuando nos alejamos tres veces la distancia a la fuente, la luz tiene que cubrir nueve veces la superficie, y así sucesivamente.



■ **Figura 4.34**
La luz se difunde para cubrir cuatro veces la superficie cuando está a dos veces la distancia de la fuente (2r) y nueve veces la superficie cuando está a tres veces la distancia (3r)



■ **Figura 4.35**
Una relación que va con el inverso del cuadrado de la distancia

■ **Tabla 4.2**
¿Son y y x^2 inversamente proporcionales?

x	y
1,34	8,8
0,96	17
0,81	24
0,70	32
0,64	38
0,59	45
0,55	52
0,52	59
0,49	66

Consideremos los datos de x e y que se muestran en la Tabla 4.2. Si $y \propto 1/x^2$, entonces x^2y = constante.

Es importante saber el aspecto que tiene gráficamente una relación que va con el inverso del cuadrado de la distancia. Si representamos gráficamente los datos de la Tabla 4.2 mediante y en el eje vertical y x en el horizontal, la forma de la curva sería similar a la de la Figura 4.35. Observa que la curva no intersecta con los ejes. Sin embargo, al contrario no es tan simple: a partir de una gráfica como esta no podemos concluir con seguridad que estamos ante una relación que va con el inverso del cuadrado de la distancia sin hacer un estudio más exhaustivo.

Ejemplo resuelto

7 Una familia está preocupada porque una compañía telefónica va a instalar una antena de transmisión de telefonía móvil (una *estación* base) a 100 m de su casa. Han leído que se recomienda que la máxima intensidad recibida sea $4{,}5\,W\,m^{-2}$.

a Si la intensidad a 1 m de la antena de la estación base es $3{,}0\,W\,m^{-2}$, calcula la intensidad aproximada cerca de su casa.

b ¿Por qué la respuesta anterior es tan solo una estimación?

c Compara tu respuesta al apartado **a** con la intensidad recibida desde un teléfono móvil situado a 5 cm de tu cabeza, suponiendo que la potencia a 1 cm de la antena de transmisión del teléfono (situada en su interior) es 50 mW.

a Ix^2 = constante

$3{,}0 \times 1^2 = I \times 100^2$

$I = 3{,}0 \times 10^{-4}\,W\,m^{-2}$

b Las antenas están diseñadas para enviar las señales en unas direcciones determinadas, no en todas las direcciones por igual (tal como se supone cuando se utiliza la ley del cuadrado de la distancia). La intensidad real recibida también depende de lo que hay entre la casa y la antena.

c $50 \times 1^2 = I \times 5^2$

I = 2mW, que es mayor que la de la respuesta al apartado **a**.

26 Una onda transversal se propaga por una cuerda, como se muestra en la Figura 4.14.
   a Si la mano se mueve con una amplitud doble (a la misma frecuencia), ¿qué le sucede a la potencia transmitida a las ondas?
   b Explica por qué disminuye la amplitud de la onda a medida que se aleja de la fuente.

27 Una parrilla de infrarrojos de 2 kW de potencia irradia energía sobre una superficie efectiva de 500 cm^2.
   a ¿Cuál es la intensidad de las ondas infrarrojas?
   b ¿Qué potencia total recibe un trozo de carne de 92 cm^2 de superficie que está sobre la parrilla?
   c ¿Cuántos minutos tarda en asarse la carne si para ello necesita $1,4 \times 10^5$ J?

28 Una onda de amplitud 12 cm tiene una intensidad de 54 $W m^{-2}$.
   a ¿Qué intensidad tiene la onda después de haberse propagado hasta que su amplitud se ha reducido a 7,0 cm?
   b ¿Cuál será su amplitud cuando su intensidad haya disminuido hasta 10 $W m^{-2}$?

29 Se considera que exponer a nuestros oídos a sonidos con una intensidad igual o superior a 10 $mW m^{-2}$ durante unos pocos minutos, constituye un riesgo para la salud.
   a ¿Qué potencia total recibe un tímpano de superficie 0,50 cm^2 con esta intensidad de sonido?
   b Si la intensidad del sonido a 2,0 m de un altavoz en un concierto de rock es 12 $W m^{-2}$, ¿a qué distancia te tienes que alejar del altavoz para recibir un máximo de 10 $mW m^{-2}$?

30 Una persona se encuentra a 1,0 m de una fuente de radiación gamma.
   a ¿A qué distancia se tiene que alejar la persona para que la intensidad de radiación recibida se reduzca en un 99%?
   b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta para responder al apartado a?

31 Investiga cuáles son los últimos datos sobre el desarrollo de la producción de electricidad a partir de las ondas oceánicas.

32 Una central eléctrica situada a la orilla del mar transforma la energía undimotriz (energía procedente de las olas del mar) en electricidad a una tasa de 50 kW por día, cuando la amplitud media de las olas es de 1,2 m.
   a Estima la potencia de salida cuando la amplitud de la ola se duplica.
   b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?
   c ¿Qué amplitud de las olas cabe esperar que produzca una potencia de 150 kW?
   d ¿Qué potencia pueden transmitir las olas de 1,0 m de amplitud?

33 Utiliza una hoja de cálculo para calcular valores de x^2, $1/x^2$ y x^2y con los datos de la Tabla 4.2. Son x^2 e y inversamente proporcionales?

34 Otra manera de saber si existe una relación entre dos conjuntos de datos es representándolos gráficamente de la manera conveniente para ver si la gráfica es una línea recta. Utiliza los valores que has calculado en la pregunta 33 para dibujar una gráfica de y con respecto a $1/x^2$. ¿Tiene la gráfica el aspecto de una recta que pasa por el origen (lo cual confirmaría la proporcionalidad inversa)?

■ Superposición

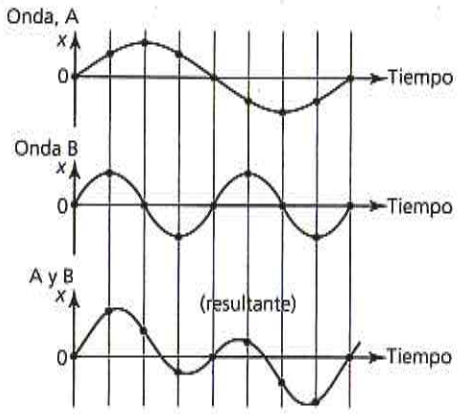
Ahora centraremos nuestra atención en lo que sucede cuando se encuentran frentes de onda procedentes de distintos lugares. En general el principio de **superposición** nos permite predecir lo que sucederá cuando se encuentran las ondas.

El principio de superposición afirma que en cualquier instante de tiempo el desplazamiento total de cualquier punto equivale a la suma vectorial de todos los desplazamientos de onda individuales.

Este principio se ilustra en la Figura 4.36. Si la onda A y la onda B se encuentran en un determinado punto, la perturbación resultante viene dada en cada instante de tiempo por la suma de los desplazamientos individuales en ese instante.

En este ejemplo las ondas A y B tienen frecuencias distintas, pero en el resto de este aparado solo tendremos en cuenta la combinación de dos ondas con la misma frecuencia.

La suma de dos (o más) ondas para obtener la onda resultante es una tarea fácil para un ordenador. La modelización por ordenador de los efectos de superposición de ondas puede ser especialmente instructiva porque se pueden ajustar fácilmente las amplitudes y las frecuencias de las ondas implicadas, y observar a continuación las consecuencias de estos ajustes. En cambio, la observación en el laboratorio de la superposición momentánea de ondas (que viajan en sentido contrario) que se cruzan no es tan fácil.



■ **Figura 4.36**
Suma de los desplazamientos de las ondas mediante el principio de superposición

En el apartado 5 de este capítulo utilizaremos el principio de superposición para explicar los modelos de interferencia estacionaria.

35 a Esboza una gráfica desplazamiento – tiempo para una duración de 1 s de una oscilación sinusoidal de amplitud 4 cm y frecuencia 2 Hz.
b Dibuja sobre los mismos ejes una curva que represente una oscilación de amplitud 2 cm y frecuencia 4 Hz.
c Utiliza el principio de superposición para dibujar esquemáticamente la resultante de estas dos ondas.

36 En la Figura 4.37 se representan dos pulsos cuadrados idénticos ideales que se desplazan uno hacia el otro. Dibuja el frente de onda resultante al cabo de:
a 6 s
b 7 s
c 8,5 s
d 10 s.

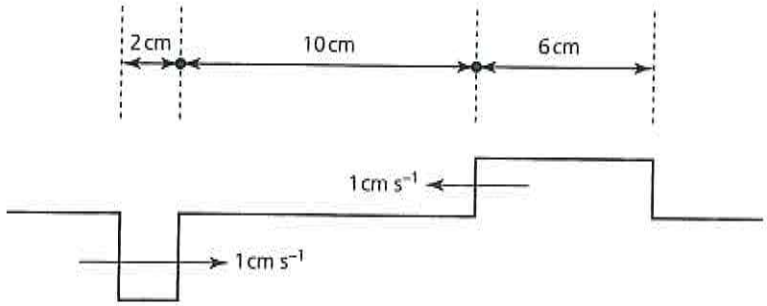


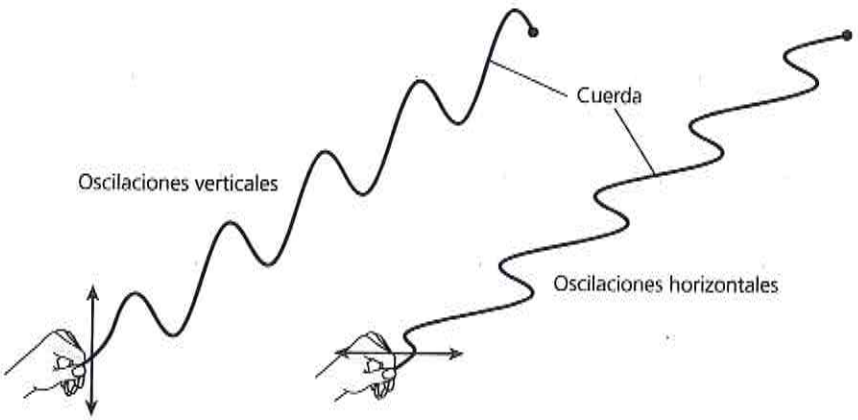
Figura 4.37

37 Dos ondas sinusoidales (A y B) procedentes de distintas fuentes tienen la misma frecuencia y atraviesan un determinado punto P, al mismo tiempo y con la misma amplitud.
a Esboza las formas de ambas ondas sobre una gráfica desplazamiento – tiempo suponiendo que las ondas llegan en fase, y a continuación dibuja la forma de onda resultante.
b Repite el proceso para dos ondas que llegan a P en contrafase.

Polarización

Consideremos el ejemplo de la transmisión de ondas transversales a través de una cuerda. Si nuestra mano solo oscila verticalmente, la cuerda solo oscilará verticalmente. En este caso se dice que la onda está **polarizada en un plano** porque solo oscila en un plano (vertical), tal como se muestra en la Figura 4.38. Si nuestra mano solo oscila horizontalmente generará una onda polarizada en un plano horizontal.

Figura 4.38
Ondas transversales a través de una cuerda



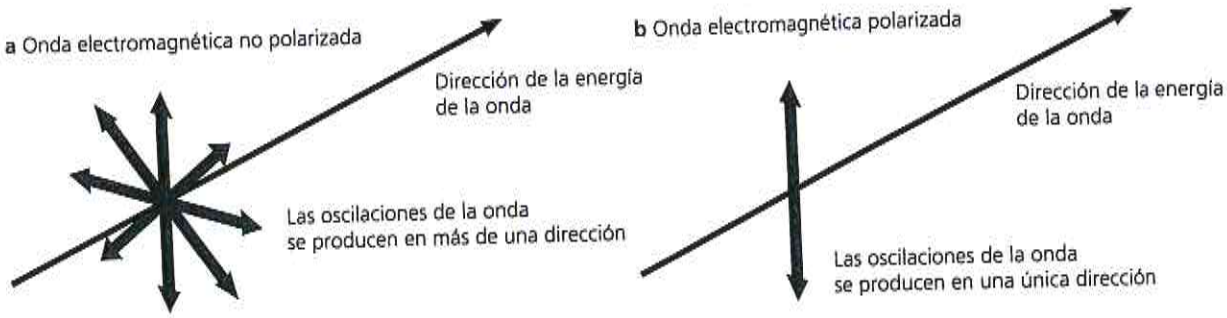
Una onda transversal está polarizada en un plano si todas las oscilaciones que transmiten la energía de la onda se producen en el mismo plano (denominado **plano de polarización**).

Las oscilaciones de la onda polarizada deben ser perpendiculares a la dirección de desplazamiento de la onda, de manera que es imposible que las ondas longitudinales, como el sonido, estén polarizadas.

Luz polarizada y otras ondas electromagnéticas

Consideremos de nuevo la Figura 4.23, en la que se representa la naturaleza de las ondas electromagnéticas. En este ejemplo, las ondas se desplazan hacia la derecha, las oscilaciones del campo eléctrico se producen en el plano horizontal y las del campo magnético en el plano vertical, pero las oscilaciones de ondas no polarizadas pueden producirse en cualquier plano perpendicular a la dirección de desplazamiento de la onda (mientras que las de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí).

Las ondas electromagnéticas, entre las que se encuentra la luz, se emiten principalmente durante procesos aleatorios e impredecibles, de manera que lo que cabe esperar es que oscilen en direcciones aleatorias y no que estén polarizadas (véase Figura 4.39a).



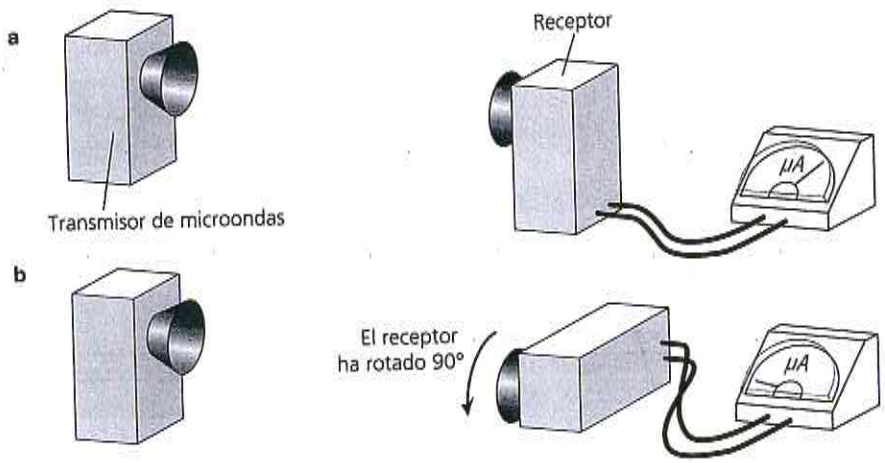
■ **Figura 4.39**
a *Radiación electromagnética no polarizada;* **b** *radiación electromagnética polarizada*

Decimos que una onda electromagnética (como la luz) está polarizada (en un plano) cuando todas las oscilaciones del campo eléctrico (o del campo magnético) se producen en un único plano, tal como se muestra en la Figura 4.39b.

Las ondas electromagnéticas generadas y trasmitidas por corrientes que oscilan en antenas (ondas de radio y microondas) están polarizadas, y las oscilaciones de los campos eléctricos son paralelas a la señal de transmisión de la antena.

En la Figura 4.40 se representa la transmisión y recepción de microondas. En la Figura 4.40a la señal que se recibe es intensa porque las antenas de transmisión y de recepción están alineadas; en cambio, en la Figura 4.40b no se recibe señal porque la antena de recepción se ha rotado un ángulo de 90°.

■ **Figura 4.40**
En la detección de microondas, el receptor debe estar en el mismo plano que el transmisor



Polarización por absorción

La luz no polarizada se puede polarizar haciéndola pasar por un filtro especial denominado **polarizador**, que absorbe las oscilaciones que se producen en todos los planos menos en uno.

Los **filtros polarizadores** para luz se fabrican con materiales constituidos por largas cadenas de moléculas que están mayoritariamente alineadas en una determinada dirección. La componente del campo eléctrico paralela a la cadena de moléculas es absorbida, mientras que la componente perpendicular a la cadena es transmitida. Por tanto, cabe esperar que la intensidad transmitida sea

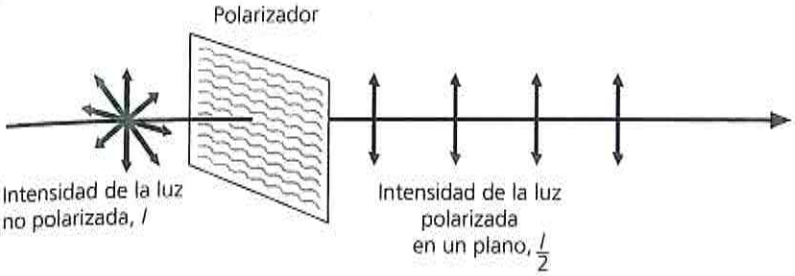


Figura 4.41
Polarizando luz por medio de un polarizador

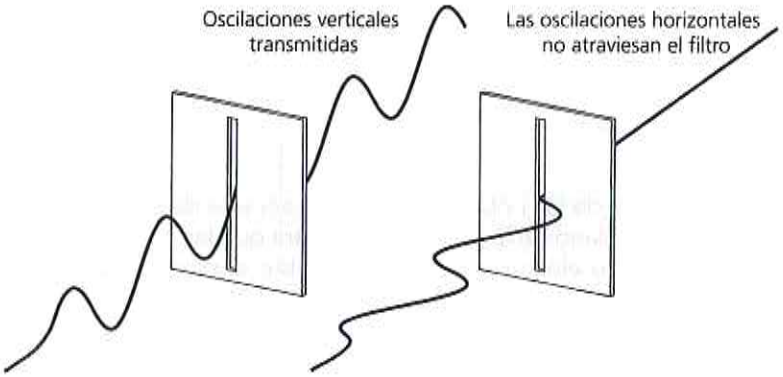


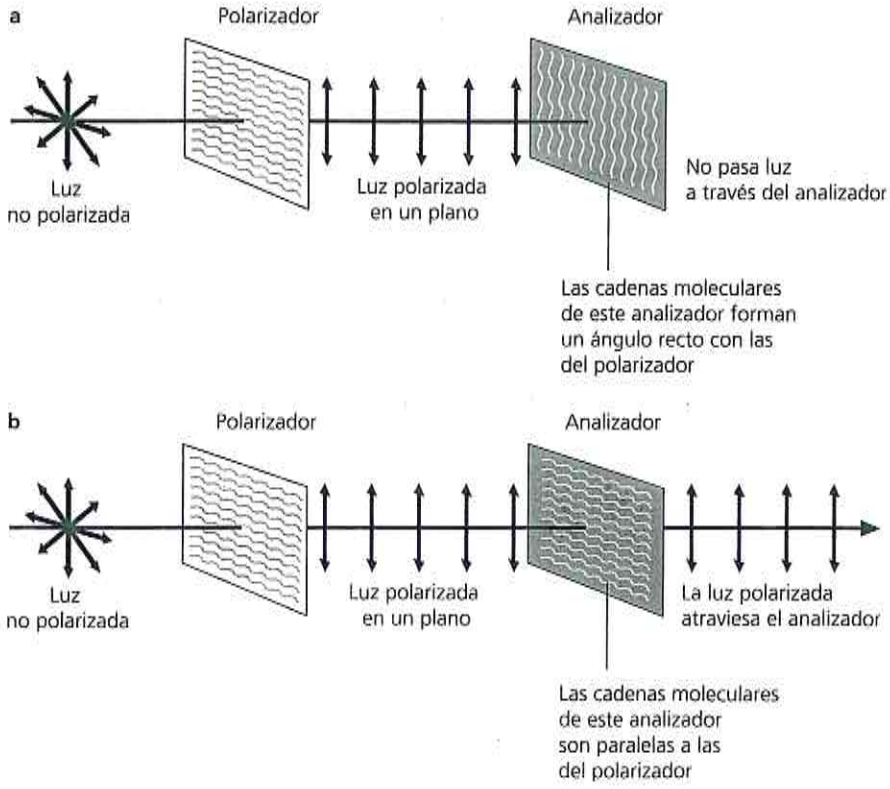
Figura 4.42
Una rendija vertical actúa como un filtro polarizador

del orden de la mitad de la intensidad incidente, como se muestra en la Figura 4.41.

Para comprender este proceso puede ser útil considerar el comportamiento de las ondas transversales generadas por la oscilación de una cuerda (como se muestra en la Figura 4.38) al atravesar una rendija vertical (véase Figura 4.42). Las ondas que oscilan de forma paralela a la rendija la atravesarán, mientras que las demás quedarán bloqueadas. La rendija actúa como un polarizador.

¿Qué sucede si la luz polarizada incide a continuación sobre un segundo filtro polarizador? La respuesta depende de la alineación de ambos filtros. Si el segundo filtro (a veces denominado analizador) transmite ondas en el mismo plano que el primero (el polarizador), las ondas lo atraviesan sin resultar afectadas, aparte de una posible disminución (ligera) de la intensidad. En este caso se dice que los filtros están en paralelo, como los de la Figura 4.43b. En la Figura 4.43a se representa la situación en la que el analizador solo permite el paso de ondas a través de un plano que forma un ángulo recto con el plano de las ondas transmitidas por el polarizador. En este caso se dice que los filtros están «cruzados» y el analizador no transmite luz. (Véase también la Figura 4.44).

Figura 4.43
Polarizador y analizador: a *cruzados;* b *en paralelo*



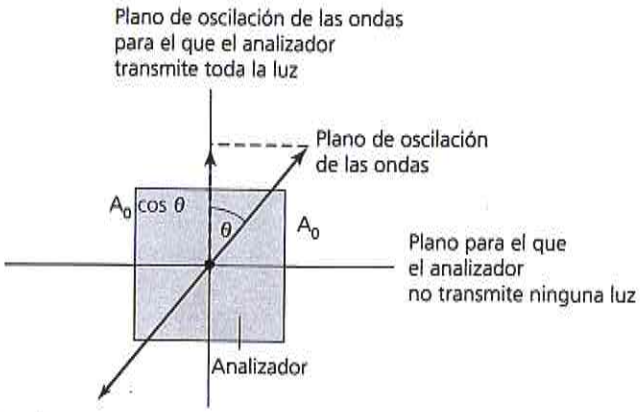
■ **Figura 4.44**
Filtros polarizadores cruzados

El segundo filtro se denomina **analizador** porque se puede rotar para analizar la luz y determinar si está polarizada y, si lo está, en qué dirección.

Si observamos un cambio en la intensidad de la luz cuando rotamos un filtro polarizador colocado delante de nuestros ojos, por ejemplo cuando miramos alrededor hacia la luz que es reflejada por diversos objetos, es porque la luz debe estar polarizada, al menos en parte. El tipo más frecuente de plástico transparente utilizado para la fabricación de polarizadores y analizadores es el **Polaroid®**.

Ley de Malus

En la Figura 4.45 se representa una onda de luz polarizada que viaja a través de un filtro polarizador (analizador) y perpendicularmente al plano de la página, de manera que las oscilaciones del campo eléctrico se producen sobre el plano del papel. El plano en el que oscilan las ondas y el plano en el que el analizador transmite todas las ondas forman un ángulo, θ.



■ **Figura 4.45**
Ángulo entre las oscilaciones y el polarizador

Si la amplitud de las oscilaciones que inciden en el analizador es A_0, la componente en la dirección en que pueden transmitirse las ondas es $A_0 \cos \theta$.

Al principio del capítulo estudiamos que la intensidad de las ondas es proporcional a su amplitud elevada al cuadrado, $I \propto A^2$; por tanto, la intensidad transmitida se puede representar mediante la ecuación:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Esta ecuación (conocida como **ley de Malus**) figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

8 **a** Si una luz polarizada verticalmente incide sobre un filtro polarizador (analizador) situado de manera que su dirección de transmisión (eje) forma un ángulo de 30° con la vertical, ¿qué porcentaje de luz atraviesa el analizador?
b Repite los cálculos para un ángulo de 60°.
c ¿Con qué ángulo pasaría el 50% de la luz?
d Esboza una gráfica donde se represente la variación de la intensidad de transmisión con la rotación del analizador (desde 0° a 360°).

a $I = I_0 \cos^2 \theta$

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2 30°$$

$$\frac{I}{I_0} = 0{,}75 \text{ o } 75\%$$

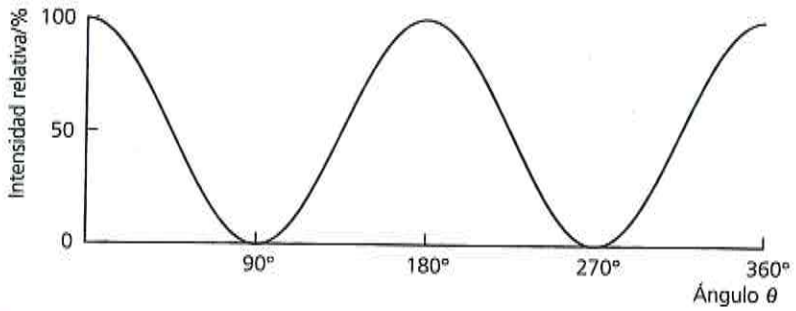
b $\frac{I}{I_0} = \cos^2 60° = 0{,}25$ o 25%

c $\frac{I}{I_0} = 0{,}50 = \cos^2\theta$

$\cos\theta = \sqrt{0{,}50} = 0{,}71$

$\theta = 45°$

d Véase la Figura 4.46. En esta gráfica se representa la variación de la intensidad transmitida a través de un filtro polarizador respecto al ángulo.



■ **Figura 4.46**

Polarización por reflexión

Cuando la luz (no polarizada) se refleja en un material aislante, las ondas se pueden polarizar y, en ese caso, el plano de polarización será paralelo a la superficie de reflexión.

l Figura 4.47
a misma escena con y sin Polaroid®

El ejemplo más frecuente de polarización por reflexión es la reflexión de la luz en agua y en cristal. Este tipo de reflexión suele ser indeseada y la cantidad de luz reflejada (que se suele llamar «reflejo») que entra en los ojos se puede reducir mediante el uso de *gafas de sol polarizadas* (*Polaroid®*), que además reducen la intensidad de la luz no polarizada a la mitad. En la Figura 4.47 se muestra un ejemplo. El pez que hay en el agua se puede ver claramente cuando se utilizan gafas de sol (*Polaroid®*). Estas reducen de forma importante la cantidad de luz reflejada por la superficie del agua que entra en los ojos. Esta reducción, sin embargo, no es la misma para todos los ángulos de visión porque la polarización depende del ángulo de incidencia. Los fotógrafos colocan un filtro polarizador giratorio sobre la lente de la cámara para reducir la intensidad de la luz reflejada.

38 ¿Cómo podrías comprobar rápidamente si unas gafas de sol son Polaroid®?

39 Un haz de luz polarizada en un plano atraviesa un analizador cuyo eje de transmisión forma un ángulo de 75° con el plano de polarización. ¿Qué porcentaje de la luz incidente emerge?

40 Cuando un haz de luz no polarizada atraviesa dos filtros polarizadores solo emerge un 20% de la luz incidente. ¿Cuál es el ángulo que forman los ejes de transmisión de ambos filtros?

41 Sugiere por qué la luz azul del cielo en un día claro y soleado está parcialmente polarizada.

42 Utiliza Internet para obtener información sobre los microscopios de luz polarizada y sus aplicaciones.

Naturaleza de la ciencia

La polarización como fuente de inspiración

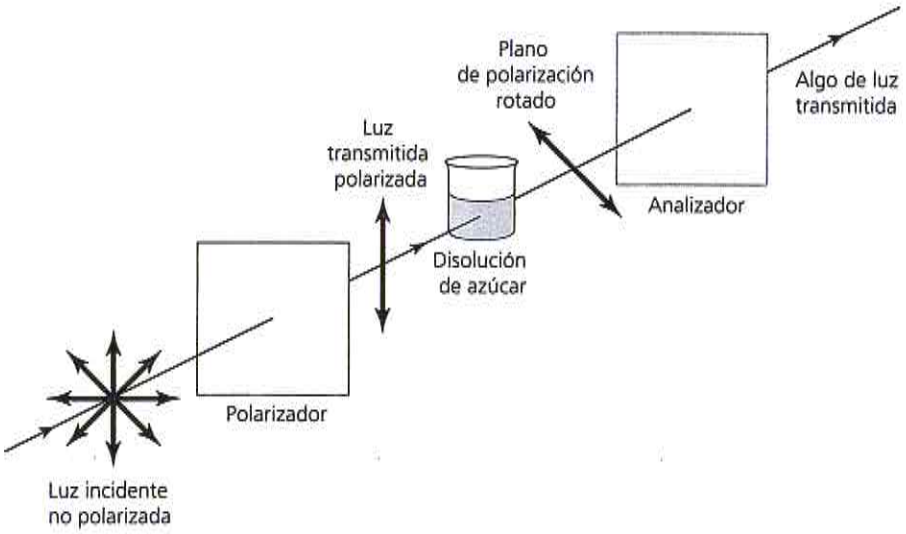
El espato de Islandia, una forma cristalina transparente de un mineral llamado calcita, puede polarizar parcialmente la luz. Esta propiedad despertó la imaginación de los primeros científicos que investigaron las propiedades de la luz. La capacidad polarizadora del espato de Islandia fue descrita por primera vez hace casi 350 años por Bartholinus, en 1669, pero se cree que casi 1000 años antes, los vikingos ya utilizaban este mineral como herramienta de navegación porque su efecto sobre los rayos de luz solar se puede utilizar para determinar la posición del Sol, incluso si el cielo está nublado.

Cuando una teoría científica, como la polarización, ha sido aceptada y utilizada durante un largo periodo de tiempo se tiende a subestimarla. Es fácil olvidar que, cuando se introdujo, fue fruto de un pensamiento original y, como tal, producto de la imaginación humana e incluso del genio. Hace falta tener mucha perspicacia e imaginación para ver el mundo de una forma distinta, y los científicos pioneros merecen un gran reconocimiento por su creatividad.

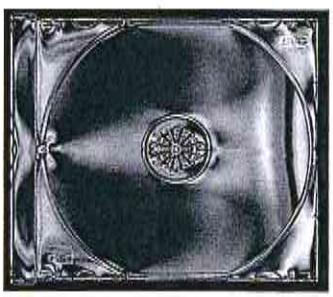
Aplicaciones de la polarización

Como ya hemos visto, cuando dos filtros polarizadores están cruzados, la luz polarizada que atraviesa el polarizador no puede atravesar el analizador, de manera que no se transmite luz. Sin embargo, un material transparente situado entre los dos filtros puede rotar el plano de polarización, lo que permite que se transmita algo de luz a través del analizador. Un material que puede rotar el plano de polarización de las ondas de luz que lo atraviesan es un material **ópticamente activo**.

En la Figura 4.48 se representa una disolución de azúcar (ópticamente activa) situada entre dos filtros polarizadores. La concentración de la disolución de azúcar puede ser determinada a partir de la magnitud de la rotación.



■ **Figura 4.48**
Rotación del plano de polarización mediante una disolución de azúcar



■ **Figura 4.49**
Concentración de esfuerzos en una caja de DVD vista con luz polarizada

Cuando están sometidos a esfuerzos, algunos plásticos y cristales se convierten en ópticamente activos y rotan el plano de polarización (véase Figura 4.49). Esta propiedad les puede resultar de utilidad a los ingenieros para la determinación de las posibles concentraciones de esfuerzos de un modelo de estructura antes de su construcción.

Pantallas de cristal líquido (LCD)

El **cristal líquido** es un estado de la materia cuyas propiedades se encuentran entre las de un líquido y las de un sólido (cristal). Y lo que es más interesante, la capacidad de rotación del plano de polarización que poseen algunos tipos de cristal líquido se puede modificar aplicándoles una pequeña diferencia de potencial, de manera que sus moléculas se orienten en la dirección del campo eléctrico.

En la Figura 4.50 se representa una disposición simplificada. Si no hay diferencia de potencial (d.p.) a través del cristal líquido el analizador no transmite luz.

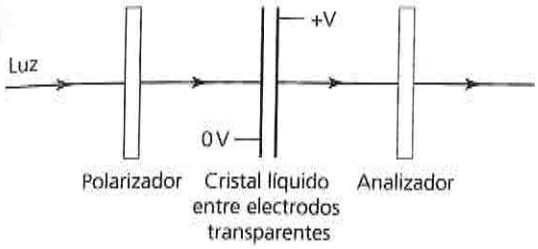


Figura 4.50
Disposición de los elementos de una pantalla de cristal líquido

Cuando se aplica una d.p. a un cristal líquido, sus moléculas se reorientan para alinearse con el campo eléctrico y el plano de polarización rota de manera que se transmite parte de la luz o su totalidad. El grado de rotación del plano de polarización y la cantidad de luz transmitida dependen de la magnitud de la d.p.

En las pantallas simples (como las de muchas calculadoras y relojes digitales), la luz que entra por la pantalla atraviesa los cristales líquidos y es reflejada de nuevo hacia el observador. Cada segmento de la pantalla aparece oscuro o iluminado en función de si se le ha aplicado o no una d.p. al cristal líquido (véase Figura 4.51).

La imagen de las pantallas de muchos ordenadores, teléfonos móviles y televisores está compuesta por unos elementos minúsculos denominados píxeles que están compuestos, a su vez, de un gran número de cristales líquidos. Los colores se crean mediante el uso de filtros, y la luz proviene de una lámpara fluorescente o de LED situada detrás de la pantalla.

Figura 4.51
Pantalla de cristal líquido compuesta por siete segmentos

43 Un haz de luz no polarizada de intensidad 48 mW incide sobre dos filtros polarizadores cuyos ejes de transmisión forman un ángulo de 20°.
- **a** ¿Qué intensidad entra en el segundo filtro?
- **b** ¿Qué intensidad emerge del segundo filtro?
- **c** Si colocamos una disolución de azúcar entre los filtros, el plano de polarización rota 28°. ¿Qué intensidad emerge en ese caso del segundo filtro?

44 Utiliza internet para investigar y comparar las principales ventajas y desventajas del uso de pantallas de cristal líquido y de LED.

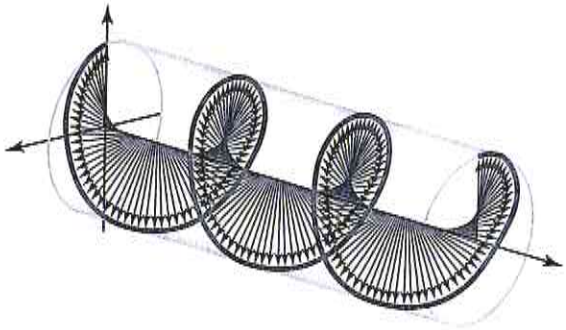
Aplicación

Polarización y cine en 3-D

Nuestros ojos y nuestro cerebro ven objetos en tres dimensiones (3-D) porque cuando ambos ojos miran un mismo objeto, cada uno de ellos recibe una imagen ligeramente distinta. Este fenómeno se denomina *visión estereoscópica* y se produce porque nuestros ojos no están situados exactamente en la misma posición. El cerebro mezcla ambas imágenes para dar la impresión de tres dimensiones o «profundidad». Sin embargo, cuando miramos una imagen bidimensional en un libro o sobre una pantalla ambos ojos reciben esencialmente la misma imagen.

Si queremos crear una imagen 3-D a partir de una pantalla plana tenemos que proporcionarle a cada ojo una imagen distinta, algo que podemos hacer gracias a la luz polarizada. (Antiguamente se empleaban otros sistemas menos efectivos, como los filtros con distintos colores). En los sistemas modernos, más simples, se toman imágenes con una cámara y se proyectan en la pantalla en forma de ondas polarizadas verticalmente. Simultáneamente se toman imágenes con una segunda cámara situada cerca de la primera y se proyectan en forma de ondas polarizadas horizontalmente. A veces se puede generar la segunda imagen mediante un programa de ordenador (en lugar de una segunda cámara) para proporcionar un efecto 3-D.

■ **Figura 4.52**
Uso de gafas polarizadas para visionar una película en 3-D



■ **Figura 4.53**
Ondas polarizadas circularmente

El observador se pone unas gafas polarizadas para asegurar que cada ojo recibe un conjunto de imágenes distintas. Las gafas permiten el paso de la luz polarizada verticalmente a uno de los ojos y la luz polarizada horizontalmente al otro. Uno de los problemas que se producen cuando se utilizan ondas polarizadas en un plano, es que los observadores tienen que mantener la cabeza en un mismo plano, sin inclinarla. Este problema se puede superar utilizando ondas polarizadas circularmente, en las que la dirección de las oscilaciones del campo eléctrico rotan continuamente en círculos, como se muestra en la Figura 4.53. Un proyector simple envía imágenes a la pantalla alternando la polarización en el sentido de las agujas del reloj, con la polarización en sentido contrario a las agujas del reloj.

1 Consulta Internet para obtener información sobre las últimas novedades en las técnicas de televisión en 3-D.

4.4 Comportamiento de las ondas

Las ondas interactúan con el medio y con otras ondas de varias maneras que pueden llegar a ser inesperadas y útiles

La forma y/o la dirección del desplazamiento de una onda pueden verse modificadas por los cambios en la velocidad de la onda, o bien, por los obstáculos que puedan aparecer en su trayectoria. Estos efectos se denominan **reflexión**, **refracción** y **difracción**. Asimismo, cuando las ondas se combinan se produce una **interferencia**. En este apartado estudiaremos cada una de estas cuatro propiedades.

■ Reflexión y refracción

Reflexión

Cuando una onda llega a una *frontera* entre dos medios distintos, normalmente una parte de las ondas o su totalidad se reflejan. En determinadas circunstancias algunas ondas pueden atravesar el segundo medio (y entonces decimos que se ha producido una cierta **transmisión** de las ondas). Un ejemplo claro podría ser el de las ondas de luz que atraviesan un material **transparente**, por ejemplo un líquido o diversos tipos de cristales. En la Figura 4.54 se puede ver tanto el efecto de reflexión como el de transmisión en una misma ventana.

Para seguir entendiendo el concepto de reflexión volvamos a considerar los dos modelos de onda con los que ya hemos trabajado anteriormente, las ondas producidas en una cuerda y las ondas producidas en agua.

Reflexión en una dimensión

En la Figura 4.55 se representa un pulso simple, producido en una cuerda o en un muelle que se desplaza hacia una frontera fija donde es totalmente reflejado sin pérdida de energía. Observa que la onda reflejada está invertida. En este caso decimos que la onda ha experimentado un cambio de fase de media longitud de onda.

■ **Figura 4.54**
Luz reflejada y luz transmitida por una ventana

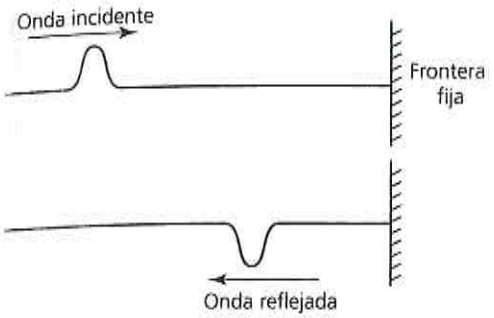


Figura 4.55
Reflexión de un pulso sobre una frontera fija

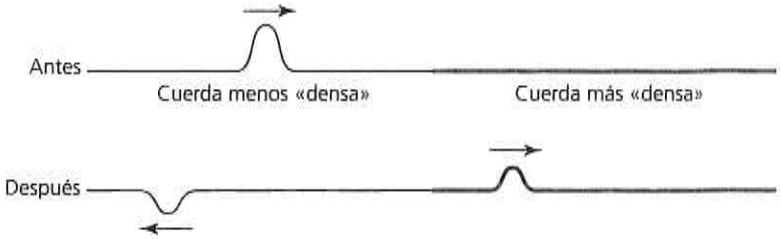


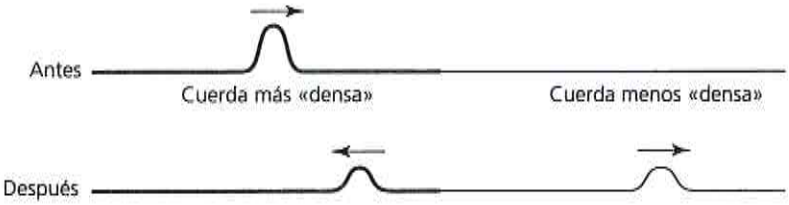
Figura 4.56
Un pulso que viaja por un medio «más denso»

La velocidad del pulso cambia cuando atraviesa una frontera entre cuerdas/muelles con distinta masa por unidad de longitud. En la Figura 4.56 se representa un pulso transversal que es transmitido desde una cuerda menos «densa» a una cuerda más «densa» (con más masa por unidad de longitud), por la que viaja más lentamente.

Observa que ahora hay dos pulsos y que las amplitudes de ambos se han reducido porque la energía se ha tenido que repartir entre los dos. El pulso transmitido tiene ahora una velocidad menor, pero su fase no ha cambiado. El pulso reflejado vuelve con la misma velocidad, pero ha experimentado un cambio de fase de media longitud de onda.

El pulso transversal de la Figura 4.57 pasa de una cuerda más «densa» a una cuerda menos «densa». Esta vez el pulso reflejado no experimenta cambio de fase.

Figura 4.57
Un pulso que viaja por un medio menos «denso»



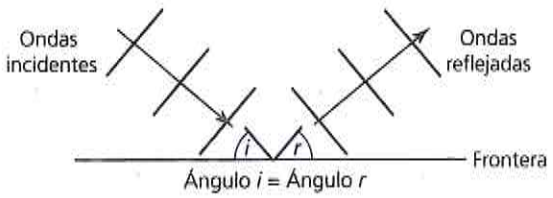
Las ondas y los pulsos longitudinales se comportan de la misma manera que las ondas transversales.

Reflexión en dos dimensiones

Cuando una onda plana se refleja sobre una frontera lisa (plana) entre dos medios, las ondas que entran (**incidentes**) y las que salen (reflejadas) forman ángulos iguales con la frontera (véase Figura 4.58).

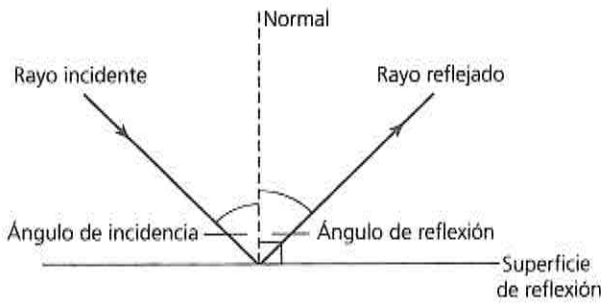
El **ángulo de incidencia**, *i*, es igual al **ángulo de reflexión**, *r*.

Figura 4.58
Reflexión de ondas planas en una frontera lisa



Cuando se trata de la reflexión de la luz, lo más habitual es representarla mediante un **diagrama de rayos** como el de la Figura 4.59.

Figura 4.59
Reflexión de rayos en una superficie de reflexión



Como antes, el ángulo de incidencia, *i*, es igual al ángulo de reflexión, *r*. Sin embargo, en este diagrama los ángulos son los que forman los rayos con la «**normal**». La normal es una línea imaginaria que dibujamos en el diagrama y que es perpendicular a la superficie de reflexión.

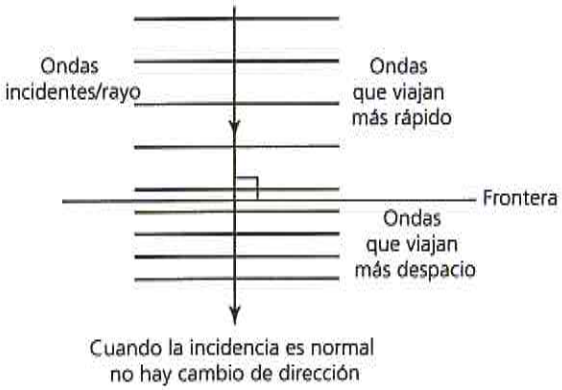
En la práctica ocurre lo mismo que en el caso de las ondas unidimensionales, parte de la energía de la onda se transmite y parte se refleja. Las ondas transmitidas pueden cambiar de dirección. A este efecto se le llama *refracción* y se trata en el subapartado siguiente.

Refracción

Cuando una onda viaja por un medio distinto habitualmente su velocidad cambia. La velocidad de las ondas acuáticas disminuye cuando atraviesan aguas más superficiales. Estos cambios de velocidad pueden tener como consecuencia un cambio en la dirección de la onda.

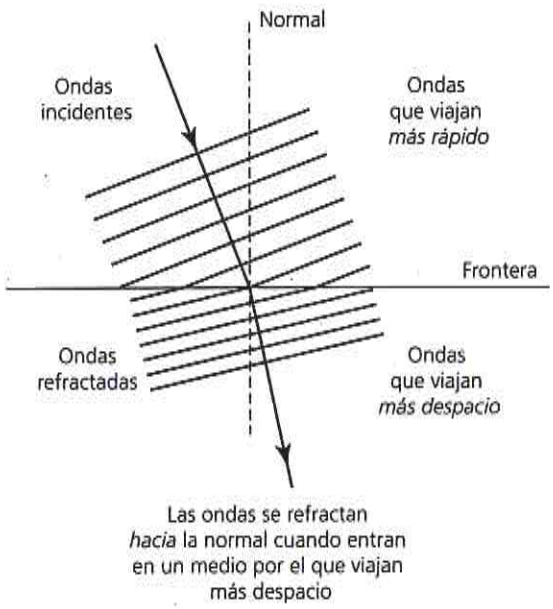
En la Figura 4.60 se representan frentes de onda planos que llegan a un medio distinto en el que viajan más despacio. Los frentes de onda son paralelos a la frontera y los rayos que representan el movimiento de la onda son perpendiculares a la frontera.

■ **Figura 4.60**
Las ondas se ralentizan cuando entran en un medio distinto



En este caso no hay cambio de dirección, pero como las ondas están viajando más despacio, su longitud de onda disminuye, aunque su frecuencia permanece constante (ten en cuenta que $c = f\lambda$). Consideremos ahora lo que sucede si los frentes de onda no son paralelos a la frontera, como en la Figura 4.61.

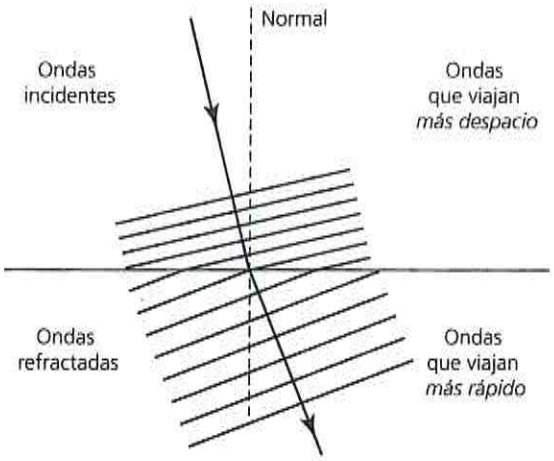
■ **Figura 4.61**
Las ondas se refractan cuando entran en un medio más denso



Distintas zonas del mismo frente de ondas llegan a la frontera en diferentes momentos y, por tanto, cambian de velocidad en diferentes momentos. Como consecuencia se produce un cambio de dirección al que denominamos *refracción*. Cuanto mayor es el cambio de velocidad, mayor es el cambio de dirección.

Cuando las ondas entran en un medio por el que viajan más despacio, se refractan *hacia la normal*. A la inversa, cuando entran en un medio por el que viajan más rápido se refractan *alejándose de la normal*. Este efecto se muestra en la Figura 4.62, pero observa que esta figura es análoga a la Figura 4.61 con las ondas viajando en sentido contrario.

Figura 4.62
Las ondas se refractan cuando entran en un medio menos denso



Las ondas se refractan *alejándose* de la normal cuando entran en un medio por el que viajan más rápido

La refracción de la luz es un tema que se trata habitualmente en física, especialmente cuando se estudian las lentes y los prismas, pero todas las ondas experimentan refracción cuando se produce un cambio en su velocidad. A menudo se trata de un cambio repentino que tiene lugar en la frontera entre dos medios, pero también puede ser un cambio gradual, por ejemplo si la densidad del medio cambia gradualmente.

En la fotografía de la Figura 4.63 se puede observar la refracción gradual de las olas que se acercan a la costa. La observación de la refracción de las olas en aguas poco profundas permite estudiar los cambios en la profundidad del agua. Las olas viajan más despacio en aguas superficiales, por tanto, las crestas de las olas se juntan (longitud de onda más corta) porque la frecuencia no cambia.

El enfoque de una lente de cristal se produce porque las ondas de luz se ralentizan y se refractan de forma sistemática por la suave curvatura de la lente (véase Figura 4.64). La refracción de la luz a través de más de una lente nos permite ampliar el rango de visión humana desde lo más pequeño (microscopios) a lo más lejano (telescopios). La *reflexión* de la luz mediante espejos curvos también sirve para enfocar la luz y se utiliza en algunos telescopios y microscopios.

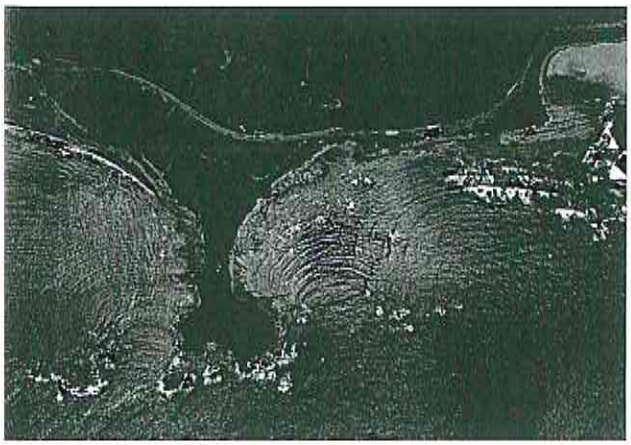
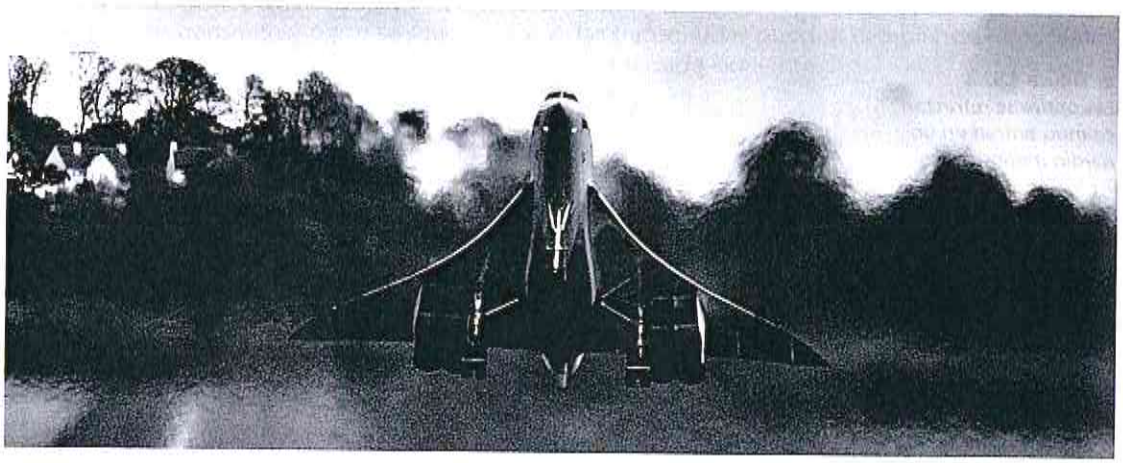


Figura 4.63
Las olas oceánicas se refractan (y se difractan) cuando se aproximan a la playa

Figura 4.64
Una lente enfoca la luz mediante la refracción

Las ondas de luz de la Figura 4.65 se refractan de una forma más desorganizada como consecuencia de la irregularidad de los cambios en la densidad del aire caliente que se desplaza sobre la pista y detrás del avión.

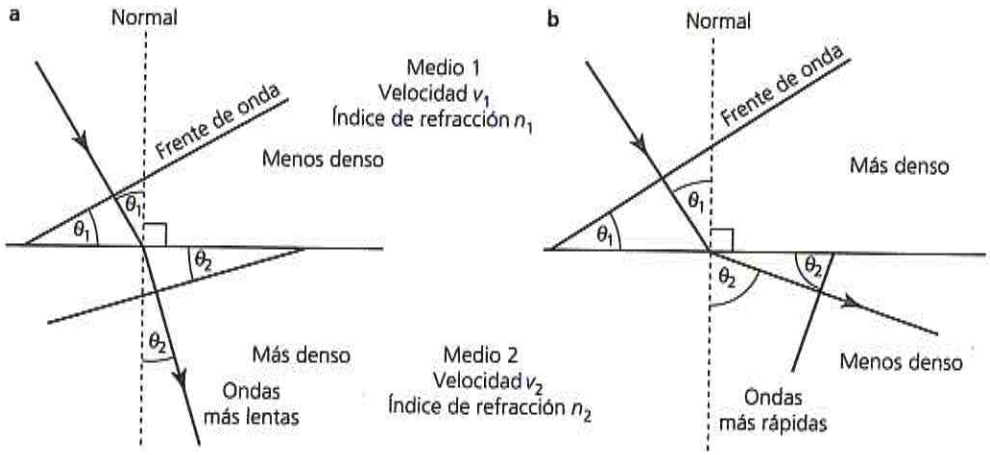
Figura 4.65
Refracción difusa de la luz debida a los gases calientes



Ley de Snell, ángulo crítico y reflexión interna total

En la Figura 4.66 se muestra un único rayo de luz que representa la dirección de las ondas que se refractan cuando entran en un medio por el que viajan más despacio (Figura 4.66a) y en un medio por el que viajan más rápido (Figura 4.66b).

Figura 4.66
Rayos de luz refractados
a *hacia la normal*
b *alejándose de la normal*



Para una frontera entre los medios determinados, se ha descubierto experimentalmente que todo ángulo de incidencia, θ_1, está relacionado con su correspondiente ángulo de refracción, θ_2, mediante la ecuación:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \text{constante, } n$$

Mediante la trigonometría podemos demostrar que este cociente es constante, porque el cociente de las velocidades de las ondas en los dos medios (v_1/v_2) es constante.

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \text{constante} = \frac{V_1}{V_2}$$

Cuando la luz viaja *desde el aire* (o, para ser más exactos, desde el vacío) hacia un medio determinado, la constante se denomina **índice de refracción**, n, del medio.

$$n_{\text{medio}} = \frac{\text{sen } \theta_{\text{aire}}}{\text{sen } \theta_{\text{medio}}} = \frac{V_{\text{aire}}}{V_{\text{medio}}}$$

El índice de refracción no tiene unidades, puesto que es un cociente.

Como la velocidad de la luz en el aire es (casi) la misma que en el vacío, el índice de refracción del aire es 1,0.

Por ejemplo, la velocidad de la luz en aire (o en el vacío) es $3,0 \times 10^8 \,m\,s^{-1}$ y en un determinado tipo de vidrio puede ser $2,0 \times 10^8 \,m\,s^{-1}$, de manera que el índice de refracción de este tipo de vidrio sería 1,5. Con esta información podemos calcular después el ángulo de refracción para cualquier ángulo de incidencia.

Consideremos de nuevo la Figura 4.66a (o la Figura 4.66b), el índice de refracción del medio 1, $n_1 = \frac{v_{aire}}{v_1}$ y el índice de refracción del medio 2, $n_2 = \frac{v_{aire}}{v_2}$, de manera que:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen}\,\theta_2}{\text{sen}\,\theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

Esta relación se conoce como **ley de Snell** y figura en el *Apéndice de datos de Física*.

El índice de refracción de un sólido transparente se puede determinar experimentalmente mediante la localización de las trayectorias de los rayos de luz que atraviesan un bloque con forma de paralelepípedo. En la Figura 4.67 se representa la trayectoria de un único rayo que entra y sale del bloque. Puede viajar en cualquiera de los dos sentidos. Una vez localizados los dos rayos (el que entra y el que sale), se puede dibujar la trayectoria del rayo en el interior del bloque y se pueden medir los ángulos de incidencia y de refracción. A partir de toda esta información se puede determinar un valor experimental del índice de refracción. Se puede repetir el mismo proceso para otros ángulos de incidencia, con lo que se obtienen diversos valores experimentales del índice de refracción y se puede calcular un índice de refracción medio. Otro método alternativo para determinar el índice de refracción es mediante la representación gráfica de los valores de θ_1 en función de θ_2, que da lugar a una recta cuyo gradiente es igual al índice de refracción.

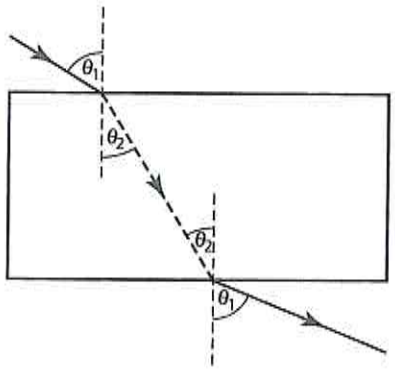


Figura 4.67 *Rayos de luz atravesando un bloque transparente con forma de paralelepípedo.*

Ejemplo resuelto

9 **a** Calcula el ángulo de refracción de las ondas de luz representadas por un rayo cuyo ángulo de incidencia es 60°, y que entra en un cristal con un índice de refracción de 1,52.

b ¿Cuál será la velocidad de la luz en el cristal? (Velocidad de la luz en el aire = $3,0 \times 10^8 \,m\,s^{-1}$)

a $n_{cristal} = \frac{\text{sen}\,\theta_{aire}}{\text{sen}\,\theta_{cristal}}$ $1,52 = \frac{\text{sen}\,60}{\text{sen}\,\theta_{cristal}}$

ángulo de refracción = $\theta_{cristal} = 35°$

b $n_{cristal} = \frac{v_{aire}}{v_{cristal}}$

$1,52 = \frac{(3,0 \times 10^8)}{v_{cristal}}$

$v_{cristal} = 2,0 \times 10^8 \,m\,s^{-1}$

45 Los rayos de luz del aire entran en un líquido con un ángulo de 38°. Si el índice de refracción del líquido es 1,4, ¿cuál es el ángulo de refracción?

46 Las ondas de agua planas que viajan a $48 \,cm\,s^{-1}$ entran en una zona de aguas poco profundas en la que los frentes de onda forman un ángulo de 34° con la frontera que separa ambos medios. Si las ondas viajan por el agua superficial a una velocidad de $39 \,cm\,s^{-1}$, predice en qué dirección se desplazarán.

47 Los rayos de luz viajan a $2{,}23 \times 10^8\,\text{m s}^{-1}$ por un líquido y a $3{,}0 \times 10^8\,\text{m s}^{-1}$ por el aire.
- **a** ¿Cuál es el índice de refracción del líquido?
- **b** Los rayos de luz que salen del líquido y entran en el aire inciden con un ángulo de 25° sobre la superficie de separación de ambos medios. ¿Qué ángulo forma el rayo que emerge en el aire con respecto a la normal?

48 El índice de refracción de un determinado tipo de cristal es 1,55. Si la luz procedente del agua (índice de refracción = 1,33) atraviesa el cristal con un ángulo de refracción de 42°, ¿cuál es el ángulo de incidencia?

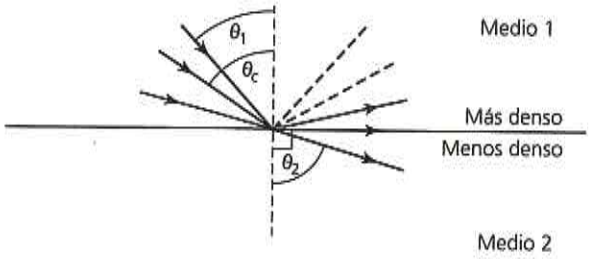
49 **a** Utiliza la trigonometría para demostrar que el cociente de los índices de refracción entre dos medios es igual al cociente de las velocidades de las ondas en ambos medios $\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$.

b Demuestra que el índice de refracción de las ondas que pasan del medio 1 al medio 2 viene dado por $_1n_2 = \frac{n_2}{n_1}$.

50 Explica por qué es imposible que el índice de refracción de un medio sea menor que la unidad.

Reflexión interna total

Consideremos de nuevo la Figura 4.66b, en la que se representa una onda/un rayo que entra en un medio menos denso desde el punto de vista óptico (un medio por el que la luz viaja más rápido). Si el ángulo de incidencia, θ_1, aumenta gradualmente, el rayo refractado se acerca cada vez más hacia la frontera entre ambos medios. Cuando el ángulo de incidencia toma un determinado valor, el rayo refractado forma un ángulo de 90° con la normal y se alinea con la frontera (véase Figura 4.68). Este ángulo se denomina **ángulo crítico**, θ_c, y se representa en color rojo en el diagrama.



■ **Figura 4.68**
La reflexión interna total se produce cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico, θ_c

Sea cual sea el ángulo de incidencia, en la frontera siempre se refleja parte de la luz incidente, pero cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico *toda* la luz se refleja y permanece en el medio más denso. Este fenómeno se denomina **reflexión interna total**.

Sabemos que $\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen}\,\theta_2}{\text{sen}\,\theta_1}$, pero en el ángulo crítico, $\theta_1 = \theta_c$ y $\theta_2 = 90°$, por tanto $\theta_2 = 1$, y entonces:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{\text{sen}\,\theta_c}$$

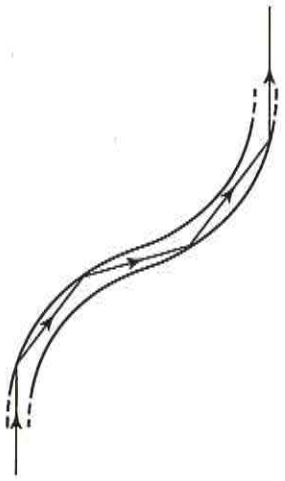
La situación más habitual es que la luz intente pasar desde un medio ópticamente más denso (medio 1), como el vidrio, el plástico o el agua, *hacia el aire* (medio 2), de manera que $n_2 = n_{\text{aire}} = 1$, y por tanto:

$$n_{\text{medio más denso}} = \frac{1}{\text{sen}\,\theta_c}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física* para la Opción C, pero *no* para el Capítulo 4.

Para investigar ángulos críticos experimentalmente se deben rastrear los rayos de luz a través de un material que no tenga forma de paralelepípedo. Lo más adecuado es utilizar un bloque semicircular de vidrio o de plástico. El ángulo crítico de un líquido se puede determinar mediante una lámpara de bajo voltaje y baja potencia sujeta con seguridad en el interior del recipiente.

Un material con un índice de refracción elevado tiene un ángulo crítico pequeño, lo que significa que la probabilidad de reflexión interna es muy elevada. Los altos índices de refracción de determinados tipos de cristales y piedras preciosas (como el diamante, por ejemplo) son los responsables de su apariencia «brillante».



■ **Figura 4.69**
Reflexión interna total a lo largo de una fibra de vidrio

Una de las aplicaciones más importantes de la reflexión interna total está en el ámbito de las comunicaciones. La luz que entra en una fibra de vidrio queda atrapada en su interior como consecuencia de las múltiples reflexiones internas que se producen, y, por tanto, puede recorrer largas distancias siguiendo la forma de la fibra (véase la Figura 4.69). Se puede modificar la luz para que transmita información digital de forma muy eficiente.

Ejemplo resuelto

10 El índice de refracción de un determinado tipo de vidrio es1,54 y el del agua es 1,33.
- **a** ¿Por cuál de estos dos medios viaja más rápido la luz?
- **b** ¿En qué circunstancias se produciría reflexión total de la luz incidente sobre la frontera entre estos dos medios?
- **c** Calcula el ángulo crítico para la luz que pasa por estos dos medios.

a El agua (porque tiene un índice de refracción más bajo).

b Cuando pasa de vidrio a agua con un ángulo de incidencia mayor que el ángulo crítico.

c $\text{sen}\ \theta_c = {}_{\text{vidrio}}n_{\text{agua}} = \frac{v_{\text{vidrio}}}{v_{\text{agua}}}$

pero $n_{\text{vidrio}} = \frac{v_{\text{aire}}}{v_{\text{agua}}}$ y $n_{\text{agua}} = \frac{v_{\text{aire}}}{v_{\text{agua}}}$

por tanto $\frac{v_{\text{vidrio}}}{v_{\text{agua}}} = \frac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{vidrio}}}$

de aquí, $\text{sen}\ \theta_c = \frac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{vidrio}}} = \frac{1{,}33}{1{,}54} = 0{,}863$

$\theta_c = 59{,}7°$

51 **a** Calcula el índice de refracción de la luz en agua de mar si su velocidad es $2{,}21 \times 10^8\,\text{m s}^{-1}$.
b Calcula el ángulo crítico para la luz que pasa entre el agua de mar y el aire.

52 **a** Describe un experimento para medir el ángulo crítico de la luz en vidrio.
b Sugiere un método para medir el ángulo crítico de la luz en agua.

53 Busca información en Internet sobre el revestimiento metálico de fibras ópticas y sobre los *ángulos de aceptación*. Redacta un breve resumen de lo que has averiguado.

54 Averigua cómo se puede utilizar la luz que viaja por una fibra óptica para transmitir datos.

Aplicación

Reflexión interna total y endoscopia

La reflexión interna total de la luz en el interior de una fibra óptica se utiliza en las endoscopias para llevar a cabo reconocimientos médicos. La luz procedente del exterior se envía a través de una fibra óptica para iluminar el interior del cuerpo. También se utilizan fibras ópticas con una lente en cada extremo para obtener una imagen enfocada que se puede visualizar desde el exterior directamente, o bien, a través de una cámara y un monitor (véase Figura 4.70).

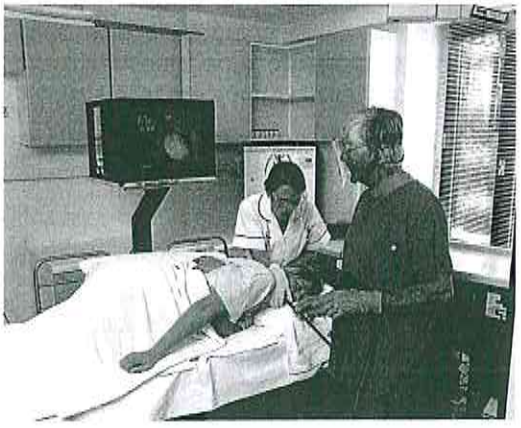


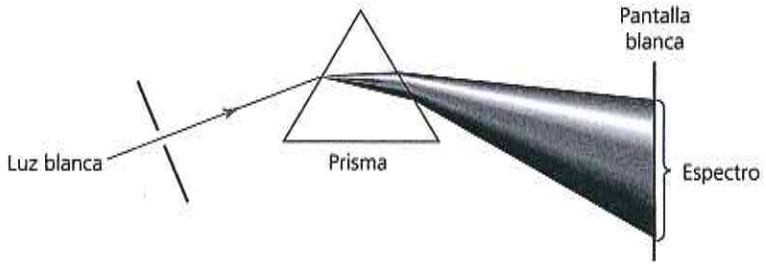
Figura 4.70 *Reconocimiento del estómago de una paciente mediante una endoscopia*

Las endoscopias se utilizan de forma generalizada en el diagnóstico de enfermedades y cada vez más en cirugía menor o en la toma de muestras para su posterior biopsia. Los endoscopios se pueden insertar a través de cualquier orificio natural e incluso a través de una incisión practicada por el cirujano.

1 Existen muchos tipos de endoscopios que se utilizan para distintas partes del cuerpo. Busca información en Internet sobre un tipo concreto de endoscopio y redacta un breve informe para presentarlo a tus compañeros.

Dispersión de la luz

Las velocidades de los distintos colores (longitudes de onda) de la luz en un medio determinado (por ejemplo el vidrio) no son exactamente iguales. La luz roja es la que viaja más rápido y la violeta es la más lenta. Como consecuencia, distintos colores que proceden de una misma fuente y que viajan en la misma dirección no recorren exactamente las mismas trayectorias cuando se refractan. Cuando la luz atraviesa un vidrio con forma de paralelepípedo (como una ventana), este efecto no suele ser significativo. En cambio, cuando la luz blanca entra o sale de vidrios con otras formas (como los **prismas** o las **lentes**), o bien atraviesa gotas de agua, puede **dispersarse** (separarse en distintos colores). Para dispersar la luz blanca y obtener un espectro (Figura 4.22) se suele utilizar un prisma triangular como el que se muestra en la Figura 4.71.



■ **Figura 4.71**
Uso de un prisma para obtener un espectro de luz blanca

Perspectivas adicionales

Ibn al-Haytham

Hasta hace poco el importante papel desempeñado por los científicos islámicos había sido insuficientemente reconocido por otras culturas. Se puede decir que Ibn al-Haytham (Figura 4.72), un científico del siglo XI también conocido como Alhazen, es uno de los mejores físicos de todos los tiempos. Fue un pionero del «método científico» moderno, ya que insistió en la experimentación y en el establecimiento de modelos matemáticos, pero vivió siglos antes que Galileo y los demás científicos ampliamente reconocidos por llevar a cabo innovaciones similares.

■ **Figura 4.72**
Ibn al-Haytham

Su obra abarca un amplio espectro de temas, incluyendo el estudio experimental y cuantitativo de la refracción de la luz (similar al que llevó a cabo Snell siglos después). Curiosamente, se dice que fue el primero en percatarse de que el «parpadeo» de las estrellas es debido a la refracción de la luz que atraviesa la atmósfera terrestre.

1 Averigua los nombres de otros científicos y matemáticos que vivieron en el siglo XI o unos pocos siglos antes. ¿Dónde vivieron? ¿Cuáles fueron sus principales descubrimientos?

2 ¿Es el progreso científico fruto del trabajo de una persona en solitario, o bien es la colaboración, y no el secretismo, un aspecto importante en la investigación?

Difracción a través de una rendija simple y alrededor de un objeto

Cuando las ondas atraviesan orificios (*aberturas*) o rodean obstáculos que aparecen en su trayectoria, tienden a «desviarse» o a «doblarse» a su alrededor. Este importante efecto se denomina **difracción** (un término que no debe confundirse con *refracción*). Las ondas suelen encontrar obstáculos en su trayectoria y el estudio de la difracción es crucial para comprender cómo se desplazan de un lugar a otro. En esta época de comunicaciones inalámbricas esta comprensión cobra una especial importancia.

En las condiciones adecuadas *todas* las ondas se difractan, y el hecho de que algo se difracte constituye una clara evidencia de su naturaleza ondulatoria. En ocasiones los efectos de la difracción son muy notorios porque suele producirse en olas y en ondas de sonido, pero en otros casos puede ser difícil de observar, como ocurre con la difracción de ondas luminosas. Esto último se debe a que la magnitud de la difracción depende de la relación entre el tamaño de la longitud de onda y el tamaño del orificio o del obstáculo.

La difracción es más importante cuando la longitud de onda y el orificio o el obstáculo tienen aproximadamente el mismo tamaño.

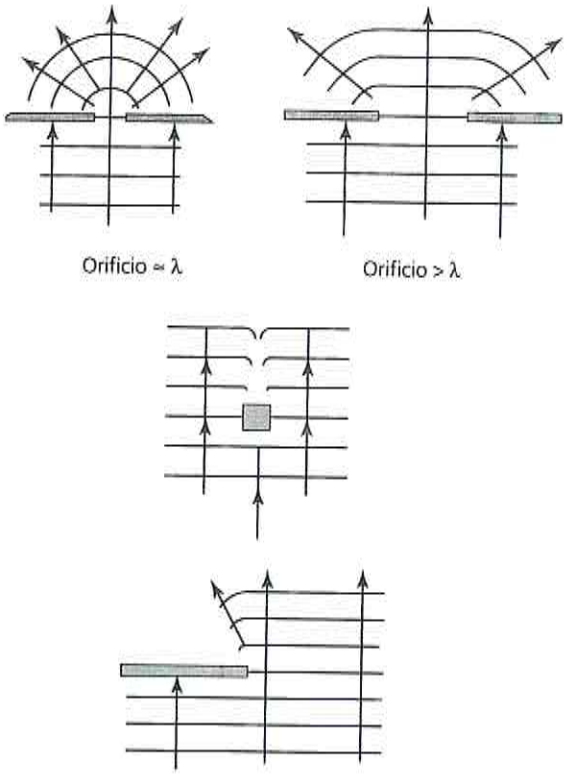


Figura 4.73
Difracción de ondas planas a través de orificios y alrededor de obstáculos (no se representan las ondas reflejadas)

En la Figura 4.73 se representa la difracción bidimensional de ondas planas a través de rendijas y alrededor de obstáculos. Este diagrama es aplicable a la difracción de todo tipo de ondas, incluso las tridimensionales, aunque es importante comprender que se trata de diagramas simplificados. Este tipo de patrones de difracción se pueden observar fácilmente en las olas generadas en un tanque de oleaje (Figura 4.29).

Ejemplos de difracción

Sonido

Las longitudes de onda se encuentran habitualmente en el intervalo comprendido entre 2 cm y 20 cm. Como consecuencia, el sonido se difracta fácilmente en las esquinas, los edificios, las puertas y los muebles y por eso podemos escucharlo incluso cuando no podemos ver de dónde proviene.

Los sonidos graves tienen longitudes de onda más largas y, por tanto, se difractan mejor alrededor de objetos grandes, como los edificios; por eso tendemos a oírlos desde más lejos. Los sonidos graves también se propagan mejor a través de altavoces grandes (que se suelen denominar «altavoces de graves» o «*woofers*»), mientras que los sonidos agudos se oyen mejor en altavoces pequeños («altavoces de agudos»).

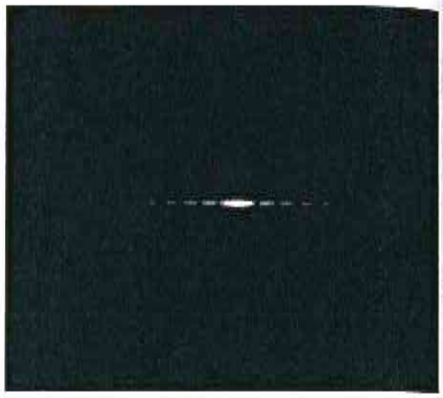
Figura 4.74
Este altavoz de gran tamaño es adecuado para emitir longitudes de onda largas a volumen alto

Luz

Los diversos colores de la luz tienen longitudes de onda inferiores a 10^{-6} m (10^{-3} mm). Como consecuencia, la difracción de la luz tiende a pasar desapercibida, ya que solo los orificios muy pequeños difractan la luz significativamente. Sin embargo, la difracción de la luz que nos entra por los ojos limita nuestra capacidad de ver (distinguir) detalles y también limita la resolu-

ción de los telescopios y los microscopios. Si observamos una superficie blanca a través de una rendija formada por nuestros propios dedos, podemos ver algunos efectos de la difracción: unas líneas negras paralelas a la longitud de la rendija.

Para observar la difracción de la luz sobre una pantalla en una cámara oscura lo mejor es utilizar **luz monocromática**. Se trata de luz de un único color o, más exactamente, luz con una única longitud de onda (o un intervalo muy corto de longitudes de onda). Los láseres son una fuente excelente de luz monocromática para la observación de la difracción. En la Figura 9.6 de la página 388 se muestra una disposición experimental típica.



■ **Figura 4.75**
Patrón de difracción de la luz monocromática que atraviesa una rendija

Cuando la luz atraviesa una rendija vertical muy estrecha y después incide sobre una pantalla separada una cierta distancia, se puede observar un patrón de difracción como el de la Figura 4.75. Se observan una serie de bandas de luz y de bandas oscuras, con una banda central más ancha y más brillante que las demás. Este patrón se estudiará más adelante en el Capítulo 9, pero es importante comprender que solo se puede explicar a partir de una teoría *ondulatoria* de la luz.

Ondas de radio

Las ondas de radio (incluidas las microondas) tienen un amplio rango de longitudes de onda, desde unos pocos centímetros hasta un kilómetro o más. Cuando los ingenieros diseñan sistemas de radiocomunicaciones para radio, TV, emisiones por satélite y teléfonos móviles, por ejemplo, tienen que escoger una longitud de onda conveniente. Para ello deben considerar qué distancia deben recorrer las ondas entre el emisor y el receptor, y si hay obstáculos en la trayectoria, como edificios o colinas. En teoría, el tamaño de las antenas de emisión y de recepción debe ser comparable al de las longitudes de onda utilizadas, aunque es posible que se tenga que reducir para abaratar costes. Por ejemplo, las longitudes de onda utilizadas habitualmente para teléfonos móviles son de unos pocos centímetros.

■ **Figura 4.76**
Las microondas emitidas por antenas se difractan

Rayos X

Los efectos de la difracción (para una longitud de onda determinada) dependen del tamaño del objeto que ocasiona la difracción. Podemos, por tanto, obtener información sobre este objeto a partir de la observación y de la medida de la difracción que ocasiona el objeto sobre una onda cuya longitud de onda es conocida. Esta idea tiene importantes aplicaciones. Los rayos X, por ejemplo, tienen longitudes de onda comparables al tamaño de los átomos, lo que permite a los científicos estudiar el espaciado de los átomos y su disposición en un sólido cristalino.

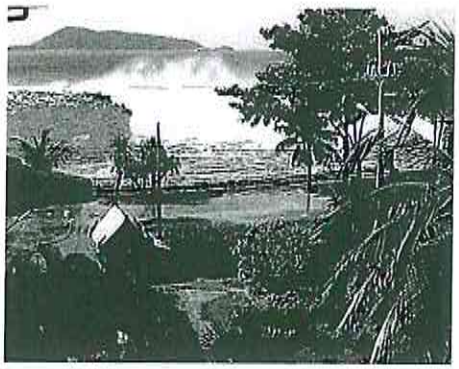
Perspectivas adicionales

Tsunamis

Las consecuencias de los tsunamis que siguieron a los devastadores terremotos que se produjeron en la isla indonesia de Sumatra el 26 de diciembre de 2004 y en la costa noreste japonesa el 11 de marzo de 2011, fueron trágicas y abrumadoras. El repentino y masivo desplazamiento de la corteza terrestre a lo largo de una línea de falla transmitió energía al océano situado encima, y tuvo como consecuencia el movimiento de un enorme volumen de agua.

Un tsunami producido por un terremoto viaja a gran velocidad (tal vez a lo largo de miles de kilómetros) con muy poca pérdida de energía, de ahí las enormes consecuencias que puede tener su llegada a la costa.

Pero, ¿por qué algunas áreas son más gravemente afectadas que otras? Por supuesto que uno de los principales factores es la altitud de la costa, así como la distribución de las viviendas y las personas. Una explicación más exhaustiva debe incluir también la refracción, la reflexión y la difracción de las ondas incidentes cuando se aproximan a la costa. Los cambios en la profundidad del agua y su orientación (respecto a la costa) afectan a la altura y a la forma de las ondas, así como a su movimiento. La forma de la línea de costa puede producir reflexiones y difracciones que tienen un efecto de concentración.



■ **Figura 4.77**
El tsunami de diciembre de 2004 tuvo efectos devastadores sobre las tierras bajas

Estos mismos argumentos permiten explicar por qué algunas playas son mucho mejores que otras para hacer surf.

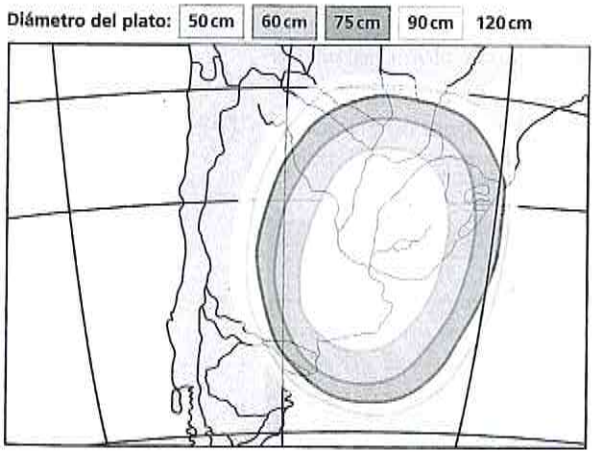
1 ¿Por qué se producen las olas oceánicas y por qué siempre parece que vayan hacia la orilla (en lugar de alejarse de ella)?

Aplicaciones

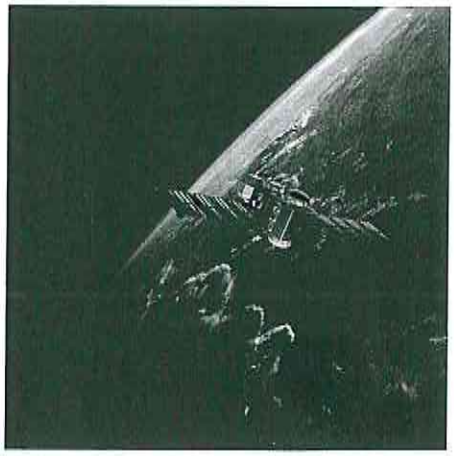
«Huellas» de satélite

En la Figura 4.78 se representa la intensidad de la señal que llega a la superficie de la Tierra desde un satélite de emisión de TV ubicado en cualquier punto sobre el ecuador terrestre. Los distintos anillos coloreados representan el diámetro de la antena (el «plato») necesario para recibir una señal lo suficientemente potente. Por ejemplo, las viviendas situadas en el anillo exterior necesitan una antena con un diámetro 120/50 = 2,4 veces más ancho que las viviendas situadas en el centro de los anillos. Esto sugiere que la intensidad recibida es aproximadamente seis veces mayor en el centro que en el anillo exterior.

La transmisión de la antena en el satélite no envía las señales de TV por igual en todas las direcciones, pero dirige las ondas a los lugares requeridos sobre la superficie de la Tierra (véase la figura 4.79). Las ondas que emergen de la antena y los reflectores experimentan una difracción, que es la responsable del tamaño y la forma de la «huella».



■ **Figura 4.78**
Huella de satélite y diámetros de plato



■ **Figura 4.79**
Satélite para la emisión de señales de TV

1 Explica por qué la información de la Figura 4.78 sugiere que la intensidad de la señal es aproximadamente seis veces más alta en el centro que en el anillo exterior.

2 Investiga cuáles son las longitudes de onda habituales de las ondas electromagnéticas utilizadas en las transmisiones de TV vía satélite y compáralas con el tamaño de las antenas de transmisión y de recepción.

Patrones de interferencia

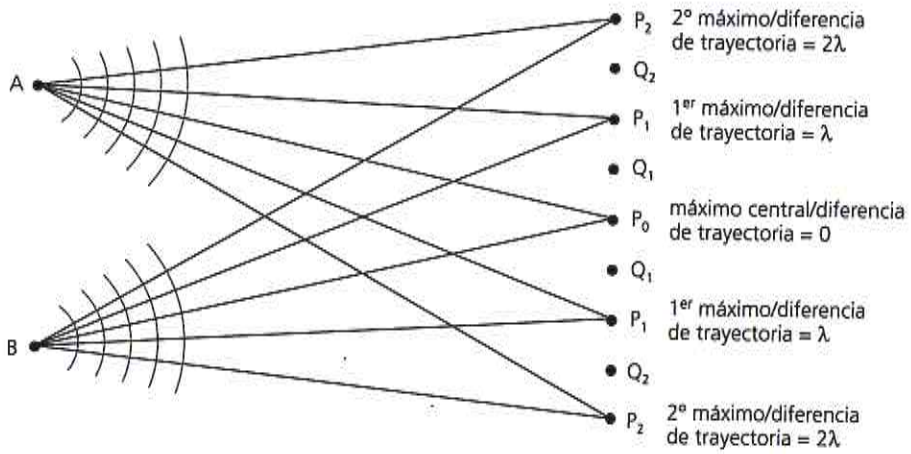
Estamos rodeados por muchos tipos de ondas, y, evidentemente, sus trayectorias se cruzan continuamente. Cuando distintas ondas se cruzan, o se «encuentran», normalmente se atraviesan sin mayores consecuencias, pero si son similares (en amplitud y longitud de onda) los resultados pueden ser importantes. Este efecto de *superposición* se conoce como **interferencia** de las ondas.

Interferencia constructiva y destructiva

Consideremos la Figura 4.80. Supongamos que las fuentes A y B emiten ondas con la misma frecuencia y en fase (o con una diferencia de fase constante). Se dice que estas fuentes son **coherentes**.

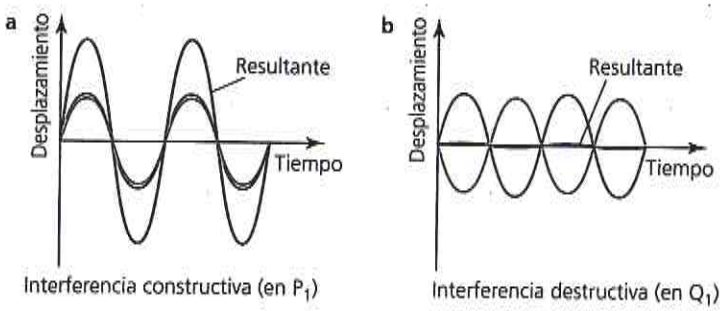
Cuando estas ondas recorren distancias iguales y a la misma velocidad para encontrarse en un punto P_0 equidistante de ambas fuentes, llegan *en fase*. Según el principio de superposición, sabemos que si las ondas individuales tienen la misma amplitud, la oscilación resultante en P_0 tiene una amplitud doble que la de las oscilaciones individuales. Se trata de un ejemplo de **interferencia constructiva**, como la que se muestra en la Figura 4.81a.

Figura 4.80
Interferencia y diferencia de trayectorias



De manera análoga existen otros puntos, como P_1 y P_2, donde las ondas están *en fase* e interfieren constructivamente, porque una de las ondas va una longitud de onda por delante de la otra (o dos longitudes, o tres, etc.).

Figura 4.81
Interferencia constructiva y destructiva



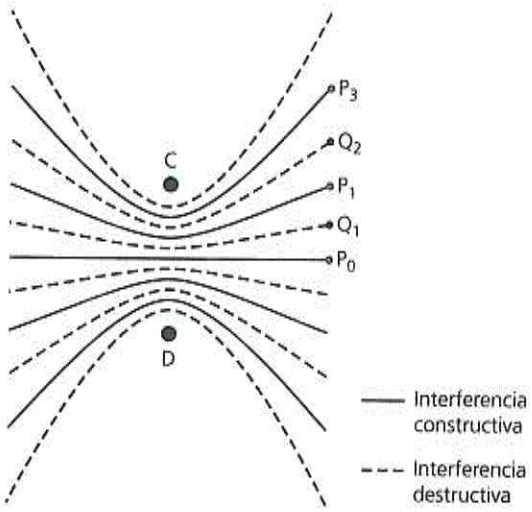
Diferencia de fase

En general, podemos afirmar que, en estas circunstancias, se produce una interferencia constructiva en un punto cualquiera donde la **diferencia de fase** equivale a un número entero de longitudes de onda. La diferencia de fase es la diferencia entre las distancias recorridas por las ondas procedentes de dos fuentes distintas que llegan a un mismo punto.

En otros lugares, como los puntos Q_1 y Q_2, las ondas llegan en *contrafase*, porque una de las ondas va media longitud de onda por delante de la otra (o una longitud y media, o dos longitudes y media, etc.). En estos lugares la oscilación resultante es mínima, un efecto denominado **interferencia destructiva** (como la que se muestra en la Figura 4.81b). La oscilación resultante probablemente no es cero porque la amplitud de una de las ondas es mayor que la de la otra, ya que las distancias que han recorrido son distintas. En general el patrón de interferencia tiene el aspecto que se muestra en la Figura 4.82.

El hecho de que haya lugares donde la combinación de dos ondas puede producir una onda resultante cero es especialmente importante porque es un comportamiento *propio* de las ondas. Por ejemplo, cuando se descubrió que la luz puede interferir se llegó a una única conclusión posible: la luz debe viajar en forma de onda.

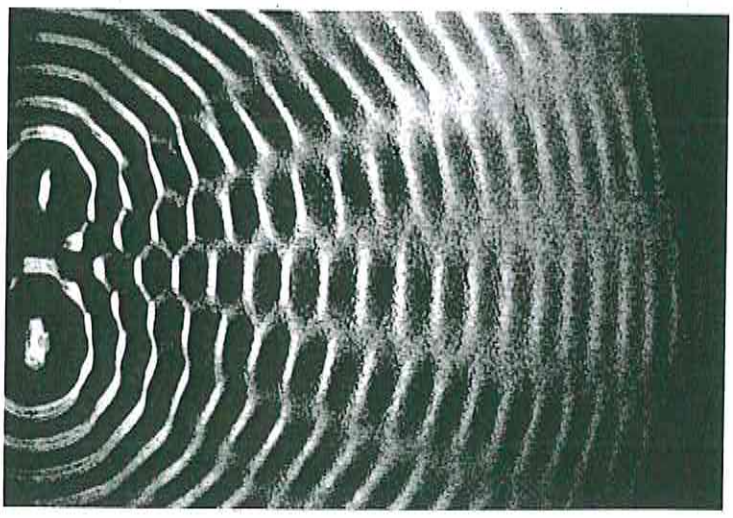
Figura 4.82
Patrón de interferencias producido por las ondas coherentes que proceden de dos fuentes, C y D



El fenómeno de la combinación de dos ondas para producir cero ondas en determinados lugares puede parecer que contradice el principio de conservación de la energía. Sin embargo, la energía «perdida» aparece en otros lugares del patrón de interferencias, justamente allá donde la interferencia es constructiva y la amplitud es doble. (Recordemos que doblar la amplitud de una oscilación implica cuadriplicar la energía).

La interferencia de ondas procedentes de dos fuentes se puede observar experimentalmente utilizando un tanque de oleaje (Figura 4.29). En la Figura 4.83 se muestra un patrón de interferencia típico. Debe compararse con el del lado derecho de la Figura 4.82.

Figura 4.83
Interferencias en un tanque de oleaje



Resumen de las condiciones necesarias para la interferencia

La condición para que se produzca una interferencia constructiva en un punto es que lleguen ondas coherentes en fase. Esto sucede cuando la diferencia de fase es igual a un número entero de longitudes de onda.

En una interferencia constructiva la diferencia de fase = $n\lambda$ (donde n es un número entero: 1, 2, 3, etc.)

La condición para que se produzca una interferencia destructiva en un punto es que lleguen ondas coherentes en contrafase. Esto sucede cuando la diferencia de fase es igual a un número impar de medias longitudes de onda.

En una interferencia destructiva la diferencia de fase = $(n + \frac{1}{2})\lambda$

Estas dos condiciones figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

En la mayor parte de los puntos de un patrón de interferencias no se produce ni una interferencia completamente constructiva ni completamente destructiva, sino un intermedio entre ambos extremos.

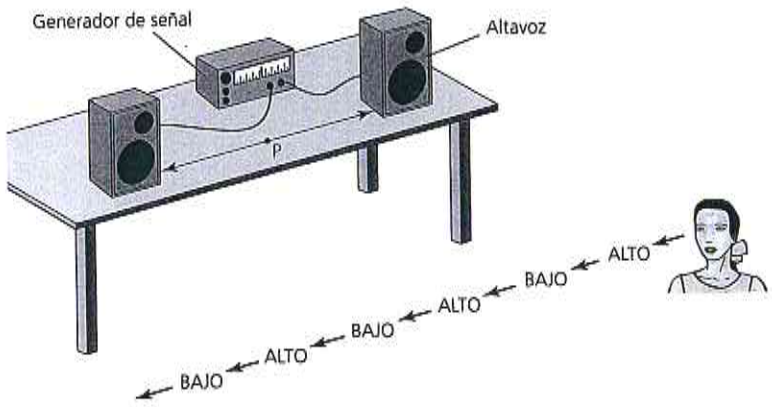
Ejemplos de interferencias

Las diferentes fuentes de ondas (como las ondas luminosas, por ejemplo) no suelen ser coherentes porque no están producidas de un modo coordinado. Así, aunque en principio *todas* las ondas pueden interferir, en la práctica este fenómeno se limita a aquellas ondas que se pueden modificar para que sean coherentes. Esto se puede hacer utilizando una única fuente de ondas y dividiendo los frentes de ondas en dos.

■ **Figura 4.84** *Interferencia de microondas*

Interferencia de ondas de sonido

Se pueden generar ondas idénticas mediante dos fuentes accionadas por una misma señal electrónica, como la de un transmisor de radio o de microondas, o unos altavoces de sonido. En la Figura 4.85 el oyente escucha el cambio de la intensidad de sonido a medida que pasa por delante de los altavoces. (Las reflexiones indeseadas de las paredes hacen difícil escuchar claramente estos cambios de intensidad en el interior de una habitación).



■ **Figura 4.85** *Interferencia de ondas de sonido*

Interferencias a través de una rendija doble

Las interferencias de las ondas luminosas se pueden observar en una habitación a oscuras haciendo pasar luz láser monocromática a través de dos rendijas colocadas muy cerca una de otra. El patrón de interferencias resultante se puede observar en una pantalla alejada (véase Figura 4.86). También se puede utilizar luz blanca (con o sin filtros), pero en ese caso el patrón es más difícil de observar.

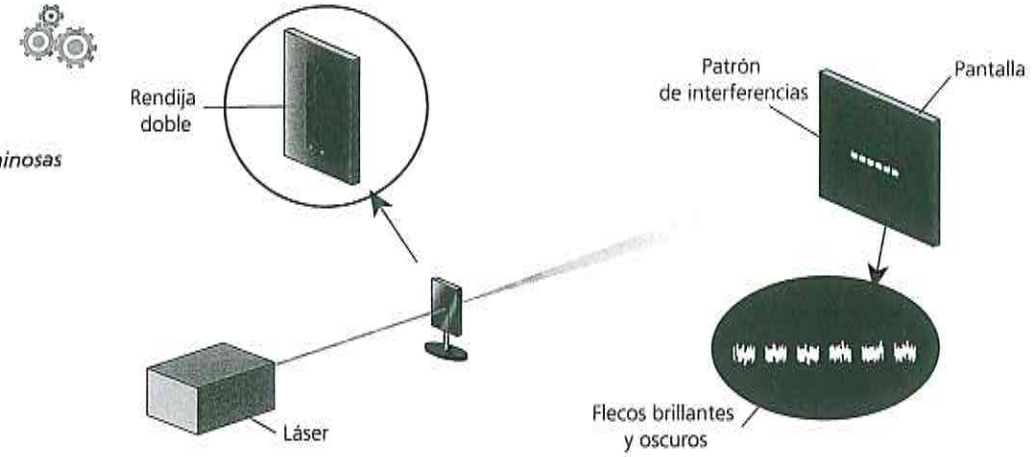


Figura 4.86 *Interferencias de las ondas luminosas*

En la pantalla se pueden ver una serie de «flecos» claros y oscuros. El patrón es similar al patrón de difracción que se obtiene cuando la luz pasa a través de una sola rendija, aunque en el patrón de interferencias la anchura de los flecos es más o menos la misma. Cuanto más cerca están las rendijas, mayor es el espaciado en el patrón de interferencias.

Este experimento fue llevado a cabo por primera vez por Thomas Young y tiene una gran relevancia histórica, porque la observación de la interferencia de la luz confirmó su naturaleza ondulatoria (ya que solo las ondas pueden experimentar interferencias o difracción). Las medidas geométricas del experimento permiten determinar la longitud de onda de la luz empleada (véase Figura 4.87).

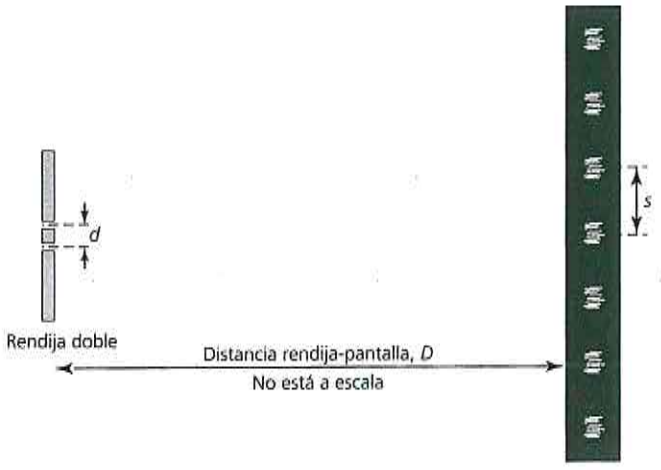


Figura 4.87 *Geometría del experimento con una rendija doble*

La longitud de onda de la luz empleada está relacionada con la geometría del experimento mediante la ecuación (que se explicará en el Capítulo 9):

$$s = \frac{\lambda D}{d}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

11 Se dirige un haz de luz láser monocromático hacia varias rendijas dobles y se observa el patrón de interferencias sobre una pantalla situada a 5,78 m de las rendijas. La distancia entre el centro de un fleco brillante y el centro de otro situado ocho flecos más allá es 5,8 cm. Calcula la longitud de onda de la radiación si la separación entre las rendijas es 0,33 mm.

$$s = \frac{\lambda D}{d}$$

$$\frac{(5{,}8 \times 10^{-2})}{8} = \frac{4{,}78\lambda}{(0{,}33 \times 10^{-3})}$$

$$\lambda = 5{,}0 \times 10^{-7}\,\text{m}$$

55 ¿Por qué en los laboratorios escolares se suelen utilizar las microondas para observar las interferencias de las ondas electromagnéticas? • P

56 La chica de la Figura 4.85 ha notado que cuando se desplaza en la dirección indicada por las flechas la separación de las sucesivas posiciones donde el sonido es intenso es 50 cm. Los altavoces están separados 120 cm y la menor distancia entre la chica y el punto P es 80 cm. Estima la longitud de onda y la frecuencia de las fuentes. S_1 •

57 En la Figura 4.88 se representan dos fuentes de ondas en un tanque de oleaje. La escala utilizada en el diagrama es 1:4. Cada fuente genera ondas con longitud de onda 2,8 cm. Toma medidas sobre el diagrama y determina qué tipo de interferencia se producirá en P. S_2 •

■ **Figura 4.88**

58 Un observador que está situado a medio camino entre dos altavoces enfrentados escucha un sonido intenso de frecuencia 240 Hz.

a Explica por qué disminuye la intensidad del sonido cuando el observador se desplaza en cualquier dirección.

b ¿Cuál es la menor distancia que tendría que desplazarse el observador para escuchar el aumento de la intensidad del sonido nuevamente hasta un máximo? (Velocidad del sonido en aire = 340 m s^{-1}.)

59 Explica por qué no se observa ningún patrón de interferencia cuando se cruzan los haces de luz procedentes de los faros de dos coches.

60 Los centros de las rendijas de la Figura 4.84 están separados 6 cm.

a Sugiere por qué se ha escogido una anchura de rendija comparable en tamaño a la longitud de onda.

b El receptor detecta un máximo de la señal cuando se encuentra a 45 cm de una de las rendijas y a 57 cm de la otra. Sugiere posibles valores de la longitud de onda de las microondas.

c ¿Cómo podrías determinar la longitud de onda real?

61 En un experimento para observar interferencias producidas con una rendija doble se utiliza luz láser de helio con una longitud de onda de 633 nm (1 nm = 1×10^{-9} m) y un par de rendijas separadas 0,50 mm. Si se desea que la separación entre los flecos de la pantalla sea de 1,0 cm, ¿a qué distancia de las rendijas se debería situar la pantalla?

62 a Averigua qué origina los colores que se observan en un arco iris (Figura 4.89).

b Si miras muy de cerca podrás observar bandas luminosas y oscuras dentro del arco iris. Estos arcos *supernumerarios* son efecto de la difracción y de las interferencias. Investiga cómo se forman.

■ **Figura 4.89**
¿Cómo se explican los arcos supernumerarios?

Aplicaciones

Uso de las interferencias para el almacenamiento de datos digitales

Los datos digitales se almacenan y se transmiten en forma binaria como series muy largas de 0 y 1 (apagado y encendido). Esto significa que cada ubicación del medio que almacena datos debe poder distinguir entre (solo) dos estados posibles. Los medios de almacenamiento óptico (como los CD, DVD o Blu-ray) emplean las interferencias constructivas y destructivas de luz láser para generar estos dos estados.

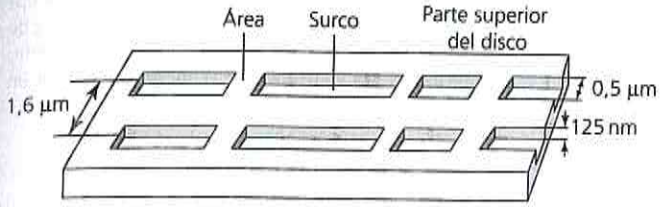
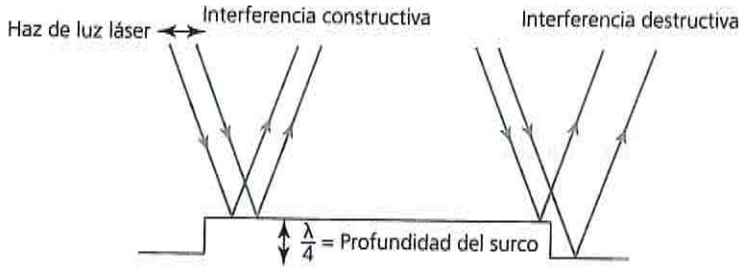


Figura 4.90
Disposición tridimensional de surcos y áreas en una pista de CD (no está a escala). La longitud de los surcos va de 830nm a 3560nm.

Los datos de un CD o un DVD se almacenan en una pista con «surcos» y «áreas» microscópicos que están grabados sobre una capa fina de plástico transparente (Figura 4.90). Estas hendiduras se recubren posteriormente con una capa fina de aluminio reflectante. Los surcos y las áreas están dispuestos uno a continuación del otro sobre una pista con forma espiral que comienza desde el centro del disco.

Para recuperar los datos se enfoca un haz de luz láser sobre la superficie del CD y se refleja en un detector. La reflexión observada depende de si el láser incide sobre un surco o sobre un área. Si incide completamente sobre un surco (o sobre un área) todas las ondas del rayo reflejado están en fase. La interferencia que tiene lugar es constructiva y se detecta una señal intensa (un «uno» binario).

Figura 4.91
Reflexión del haz de luz sobre un surco y sobre un área (en este ejemplo la luz incide en un ángulo determinado pero en un reproductor de CD incide casi perpendicularmente a la superficie del disco)



Si parte del haz de luz láser incide sobre un surco y parte lo hace sobre un área se produce una diferencia de trayectoria entre las dos partes del haz de luz. La profundidad del surco está calculada de modo que si la longitud de onda del haz de luz láser es λ, la diferencia de trayectorias sea $\lambda/2$, de manera que se produce una interferencia destructiva y no se genera señal (un «cero» binario). Como la diferencia de trayectorias es el doble de la profundidad del surco, para obtener una diferencia de trayectorias de $\lambda/2$, la profundidad del surco debe ser = $\lambda/4$.

El haz de luz láser se refleja en la pista espiral rotatoria y la señal recibida por el detector cambia a medida que el haz pasa de surco a área y de nuevo a surco. Se generan así señales digitales de 1 y 0 que varían según si la interferencia es constructiva o destructiva y también según las longitudes de los surcos y las áreas.

Se estima que la capacidad mundial de almacenamiento de datos se duplica cada dos o tres años como consecuencia del interés que tienen las personas en conservar fotografías y videos y el interés que manifiestan las organizaciones en conservar todos los registros de datos posibles. Los datos se almacenan principalmente de forma electrónica, magnética u óptica, aunque son preferibles los pequeños sistemas en estado sólido (sin piezas móviles) SSD (discos duros en estado sólido, por sus siglas en inglés) si su capacidad de almacenamiento es lo bastante grande.

Almacenar información es relativamente sencillo pero no somos conscientes de que eliminarla cuando ya no es útil no es tan simple como pulsar un botón. La información, que puede ser falsa, estar desactualizada o ser simplemente incómoda, puede seguir almacenada y estar a disposición de muchas personas de manera indefinida. Esto es particularmente cierto en el caso de Internet, donde nuestra «huella digital» (los datos que dejamos registrados) puede ser mucho más grande de lo que imaginamos.

1 Compara las ventajas y desventajas de almacenar datos en un disco óptico, un lápiz de memoria, un disco duro externo HDD (o un disco duro en estado sólido SSD) y la «nube».

Enlace con la teoría del conocimiento

Teorías opuestas

Huygens y Newton propusieron dos teorías opuestas sobre el comportamiento de la luz. ¿Cómo decide la comunidad científica entre dos teorías opuestas?

Christiaan Huygens fue un importante científico y matemático holandés que sostenía que las propiedades de la luz conocidas en aquella época (alrededor de 1670), se podían explicar considerando la luz como una onda. Esta idea entraba en conflicto con la teoría de la naturaleza de la luz conocida generalmente como «teoría corpuscular» de Newton. Algunas propiedades de la luz (como la reflexión y la refracción) se podían explicar mediante la teoría de Newton, que asumía que la luz consistía en unas diminutas partículas, mientras que la polarización y la difracción de la luz se podían explicar mediante la teoría ondulatoria de Huygens.

La teoría corpuscular no podía explicar la interferencia de la luz, como demostró Young más de un siglo después, a principios del siglo XIX. Si la luz interfiere, debe tener propiedades ondulatorias, pero todas las demás ondas conocidas necesitaban desplazarse a través de un medio. Por ejemplo, el sonido puede viajar a través del aire pero no a través del vacío, porque no hay moléculas oscilantes que transporten las ondas.

Se atribuye a Descartes el desarrollo del concepto de «éter» unos 150 años antes. El «éter» era una sustancia misteriosa e indetectable que estaba por todas partes, llenando todo el espacio. Los científicos adoptaron esta idea para poder explicar cómo podía viajar la luz a través del espacio. (Descartes había propuesto el éter para explicar cómo podían actuar las fuerzas (magnéticas, gravitatorias, eléctricas) «a distancia» entre los objetos, es decir, sin haber nada en el espacio entre estos).

La teoría del éter era muy poco convincente pero fue ampliamente aceptada durante dos siglos, hasta que fue desacreditada por los trabajos de Einstein a principios del siglo XX. Estos se basaban en el descubrimiento de Michelson y Morley de que la velocidad de la luz era la misma en todas direcciones con respecto al movimiento de la Tierra.

Naturaleza de la ciencia

Dualidad onda-partícula

La naturaleza de la luz ha sido durante siglos un tema central y objeto de debate en el desarrollo de la física. Muchos físicos famosos han propuesto teorías útiles en el pasado, pero ninguna de ellas ha sido enteramente satisfactoria o capaz de explicar todas las propiedades de la luz. Actualmente los científicos aceptan que no existe un único modelo de la naturaleza de la luz que pueda explicar completamente su comportamiento. Parece que se necesitan modelos distintos para circunstancias distintas. Esta idea se conoce como **dualidad onda-partícula** de la luz, la cual se explica con más detalle en otras partes del libro.

4.5 Ondas estacionarias

Cuando las ondas viajeras se encuentran, se pueden superponer para formar ondas estacionarias en las que no se produce transferencia de energía

En este capítulo hemos hablado hasta ahora de *ondas viajeras*, que transfieren energía progresivamente desde una fuente hasta lugares alejados de esta. Ahora centraremos nuestra atención en ondas que permanecen en la misma posición.

Naturaleza de las ondas estacionarias

Consideremos dos ondas viajeras con la misma forma, frecuencia, longitud de onda y amplitud moviéndose en sentidos opuestos, como las que se muestran en la Figura 4.92, que podrían representar las ondas transversales generadas en una cuerda.

Figura 4.92
Dos ondas sinusoidales viajando una hacia la otra

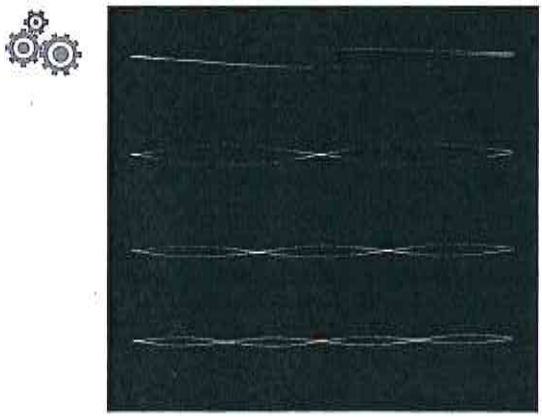


Figura 4.93
Ondas estacionarias en una cuerda tensada

Cuando estas ondas se atraviesan se pueden combinar para producir un patrón de ondas oscilantes que no cambian de posición. Estos patrones se denominan **ondas estacionarias**. Este tipo de patrón se acostumbra a producir en sistemas cerrados, en los que las ondas se reflejan unas en otras repetidamente. En la Figura 4.93 se muestran ejemplos típicos de patrones de ondas estacionarias. Es importante remarcar que la cámara necesita un breve periodo de tiempo para producir una imagen (no se trata de una imagen instantánea), y este es el motivo por el cual la cuerda que se mueve rápidamente aparece borrosa. Lo mismo ocurre cuando vemos la cuerda moviéndose rápidamente con nuestros propios ojos.

Se pueden generar fácilmente patrones simples de ondas estacionarias haciendo oscilar a una frecuencia adecuada uno de los extremos de una cuerda, o de un muelle alargado, mientras otra persona mantiene el otro extremo fijo. Los patrones como los de la Figura 4.93 requieren frecuencias más elevadas (porque un muelle tiene mucha menos masa que una cuerda), pero se pueden generar haciendo vibrar una cuerda tensada mediante un vibrador mecánico controlado por las oscilaciones eléctricas variables procedentes de un **generador de señal**. Este aparato se puede utilizar para estudiar en qué lugares aparece estacionaria la cuerda y para qué frecuencias ocurre.

Nodos y antinodos

En una onda estacionaria hay puntos donde el desplazamiento es *siempre* cero. Estos puntos se denominan **nodos**. En las posiciones situadas entre los nodos, las oscilaciones de todas las partes del medio están *en fase*, pero la amplitud puede variar. A medio camino entre dos nodos la amplitud es máxima. Estas posiciones se denominan **antinodos**. En la Figura 4.94 se representa esquemáticamente la tercera onda de la fotografía de la Figura 4.93. Observemos que la distancia entre dos nodos (o antinodos) consecutivos es una longitud de onda.

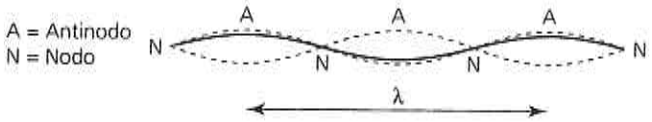


Figura 4.94 *Nodos y antinodos en una onda estacionaria en una cuerda tensada – la línea sólida representa una posible posición de la cuerda en un instante determinado*

Una onda estacionaria lleva asociada una energía, de manera que en ausencia de fuerzas disipativas, la oscilación continuaría indefinidamente. Sin embargo, la onda estacionaria no *transfiere* energía fuera del sistema.

Podemos describir la formación de un patrón de ondas estacionarias mediante la determinación de la resultante en cada lugar e instante de tiempo. Para ello podemos utilizar el *principio de superposición*. El desplazamiento total es la suma de los dos desplazamientos individuales en cada momento. Los nodos se producen en lugares donde las dos ondas están *siempre* en contrafase. En el resto de lugares, el desplazamiento oscila entre cero y un valor máximo que depende de la diferencia de fase. En los antinodos las dos ondas están siempre en fase. (Es recomendable que los estudiantes utilicen simulaciones por ordenador para ilustrar este concepto, variable dependiendo del instante en el que se analiza).

Se pueden producir ondas estacionarias con cualquier tipo de onda que se mueva en una, dos o tres dimensiones. Por simplicidad, en este apartado trabajaremos únicamente con ondas unidimensionales, como las ondas transversales en una cuerda tensada.

Condiciones de frontera

Las ondas estacionarias se producen frecuentemente cuando las ondas se reflejan de forma repetida en las fronteras de un espacio limitado, como las ondas en una cuerda o el aire en un tubo. Las frecuencias de las ondas estacionarias dependen de la naturaleza del extremo de la cuerda o del extremo del tubo. Son las denominadas **condiciones de frontera**. Por ejemplo, los extremos de una cuerda se pueden fijar en una posición determinada, o bien se pueden dejar libres; los extremos de un tubo pueden estar abiertos o cerrados. Cuando los extremos se pueden mover libremente podemos esperar que la onda estacionaria tenga antinodos, y cuando los extremos están fijos podemos esperar que tenga nodos.

Modos de vibración de ondas transversales en cuerdas

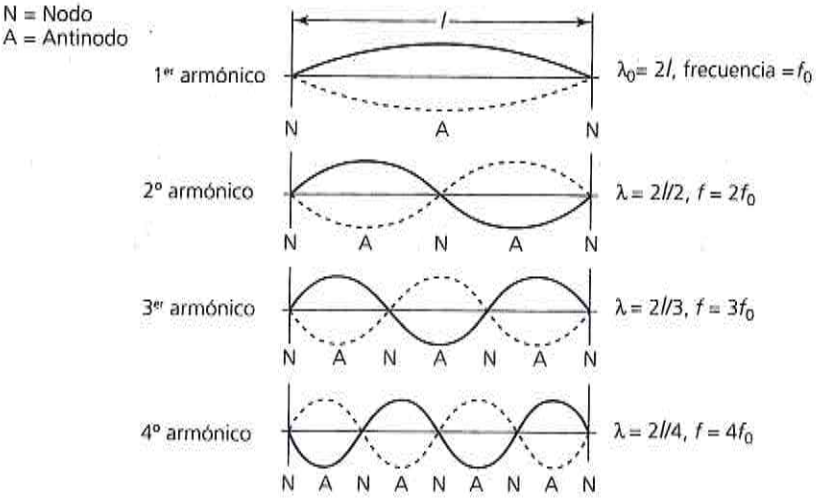


Figura 4.95 *Modos de vibración de una cuerda tensa fijada por ambos extremos*

Si tiramos de una cuerda tensa fijada por ambos extremos, la cuerda solo puede vibrar en forma de onda estacionaria con nodos en ambos extremos. La manera más simple en que puede vibrar se muestra en la parte superior de la Figura 4.95 y se denomina **primer armónico**. (A veces también se le llama *modo fundamental* de vibración). Normalmente es el modo de vibración más importante, pero al mismo tiempo se pueden producir toda una serie de armónicos, algunos de los cuales

se muestran en la Figura 4.95. La longitud de onda, λ_0, del primer armónico es $2l$, donde l es la longitud de la cuerda. La velocidad de la onda, v, a lo largo de la cuerda depende de la tensión y de la masa por unidad de longitud. La frecuencia del primer armónico, f_0, se puede calcular a partir de $v = f\lambda$:

$$f_0 = \frac{v}{\lambda_0}$$

$$= \frac{v}{2l}$$

Esta expresión nos indica que, para un determinado tipo de cuerda sometida a tensión constante, la frecuencia del primer armónico es inversamente proporcional a la longitud del muelle. El primer armónico de una cuerda más larga tendrá una frecuencia más baja.

Las longitudes de onda de los armónicos empezando por el primero (el más largo) son $2l, \frac{2l}{2}, \frac{2l}{3}, \frac{2l}{4}$, etc.

Las frecuencias correspondientes, empezando por la más baja, son f_0, $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, etc.

Ejemplo resuelto

12 Una cuerda tiene una longitud de 1,2 m y la velocidad de las ondas transversales es 8,0 ms^{-1}.
- **a** ¿Cuál es la longitud de onda del primer armónico?
- **b** Dibuja esquemáticamente los cuatro primeros armónicos.
- **c** ¿Cuál es la frecuencia del tercer armónico?

a $\lambda_0 = 2l = 2 \times 1{,}2 = 2{,}4\,m$

b Véase la Figura 4.95.

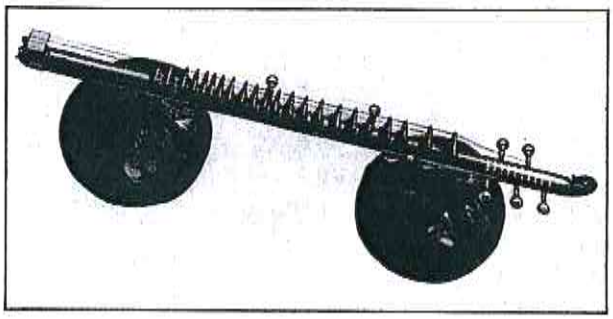
c $\lambda = \frac{2{,}4}{3} = 0{,}8\,m$

$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{8{,}8}{0{,}8} = 10\,Hz$

Las ondas estacionarias en cuerdas se obtienen normalmente entre extremos fijados, pero es posible que una de las fronteras, e incluso las dos, se dejen libres. Si hay antinodos en cada frontera, la frecuencia del primer armónico será la misma que para fronteras fijas, con nodos en cada extremo. Si hay un nodo en un extremo y un antinodo en el otro, la frecuencia del primer armónico será menor. Un ejemplo de esta situación podría ser una onda estacionaria producida en una cadena que cuelga verticalmente.

Instrumentos musicales

La variedad de instrumentos utilizados en todo el mundo durante miles de años es asombrosa (véase la Figura 4.96). El funcionamiento de la mayoría de estos instrumentos utiliza la creación de patrones de ondas estacionarias (de distintas frecuencias) en cuerdas, alambres, superficies o tubos de alguna clase. Las vibraciones perturban el aire que los rodea y en consecuencia se emiten ondas de sonido (música).



■ **Figura 4.96**
Una vina, un antiguo instrumento indio construido con bambú y dos calabazas

Cuando se interpretan notas musicales en instrumentos de cuerda, como guitarras, violoncelos y pianos, las cuerdas vibran principalmente en el primer armónico, pero también suenan otros armónicos. Esta es una de las razones por las que cada instrumento tiene su propio e inconfundible sonido. En la Figura 4.97a se muestra el rango de frecuencia que se puede obtener con una cuerda de guitarra que vibra con un primer armónico de 100 Hz. Los factores que afectan a la frecuencia del primer armónico son la longitud de la cuerda, la tensión y la masa por unidad de longitud. Por ejemplo, la nota Do central (C4) tiene una frecuencia de 261,6 Hz. Las ondas transversales estacionarias de una cuerda que vibra, se utilizan para hacer que el resto de los instrumentos musicales oscilen a la misma frecuencia. Cuando las superficies que vibran golpean el aire que les rodea, se generan ondas de sonido longitudinales que se propagan desde el instrumento hasta nuestros oídos.

Para fomentar la discusión en grupo puede ser interesante que los alumnos traigan distintos instrumentos musicales al laboratorio con el objeto de comparar cómo se generan los sonidos y cómo se controlan las frecuencias. El análisis de frecuencias puede ser particularmente interesante (como el de la Figura 4.97a). Y a la inversa, existen programas de ordenador que permiten la síntesis de sonidos mediante la suma (superposición) de formas de onda elementales.

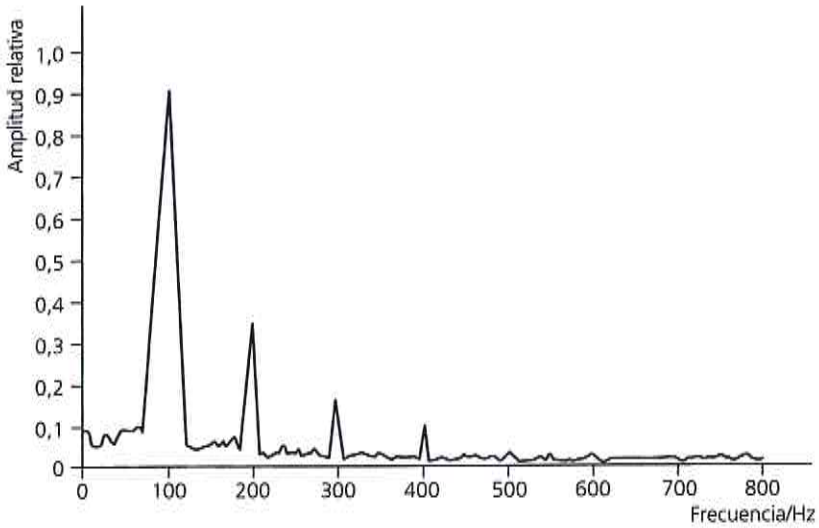


Figura 4.97a
Espectro de frecuencias de una cuerda de guitarra

Figura 4.97b
Creación de ondas estacionarias con un violoncelo

Enlace con la teoría del conocimiento

Comprender lo que no vemos requiere imaginación

Las ondas estacionarias generadas en cuerdas están estrechamente ligadas a la teoría de Schrodinger sobre la probabilidad de la amplitud asociada a la función de onda de los electrones atómicos. La aplicación a la teoría de supercuerdas requiere patrones de ondas estacionarias en 11 dimensiones. ¿Cuál es el papel que desempeñan la razón y la imaginación en la habilidad de los científicos para visualizar escenarios que están más allá de nuestras capacidades físicas?

Las ondas estacionarias en cuerdas solo pueden vibrar en una serie de frecuencias determinadas que además están relacionadas matemáticamente. Cuando se descubrió que el electrón de un átomo de hidrógeno solo puede estar en unos determinados niveles de energía relacionados matemáticamente, se concluyó que la teoría de las ondas estacionarias se podía aplicar también a los átomos. Sin embargo, no implica que existan similitudes físicas entre cuerdas y electrones.

Naturaleza de la ciencia

Procesos de razonamiento común

La conexión entre las notas musicales simples y las matemáticas se conoce desde hace más de 2000 años. Se suele atribuir a Pitágoras ser el primero en reconocer esta relación aproximadamente en el año 600 a.C. Exista o no esta relación, la «Música de las Esferas» fue una filosofía muy arraigada y visionaria que buscaba encontrar patrones numéricos y armonías, no solo en la música sino en el mundo en general y también en las observaciones astronómicas.

Se pueden encontrar ideas relativas a las ondas estacionarias a lo largo de un periodo de más de 2500 años, desde los antiguos instrumentos musicales hasta las últimas *teorías de supercuerdas* englobadas en la *teoría del todo*, pasando por la disposición de los electrones en los átomos. Es un tema común de las diversas áreas de conocimiento de la ciencia: una terminología compartida y un **proceso de razonamiento común** se desarrollan y evolucionan a lo largo del tiempo. Cuando nos enfrentamos a un nuevo descubrimiento o innovación, nuestro instinto natural nos lleva a interpretarlo en términos del conocimiento existente.

Ondas estacionarias de sonido generadas en tubos

Se pueden generar ondas de sonido longitudinales estacionarias haciendo vibrar el aire en diversos recipientes y tubos. El sonido que se produce al soplar a través de la boca de una botella vacía es un ejemplo cotidiano. Muchos instrumentos musicales, como la flauta y el clarinete, basan su funcionamiento en esta misma idea. Por simplicidad, consideraremos únicamente las ondas generadas en *tubos* uniformes (también llamados *columnas* de aire).

Como sucede en el caso de las cuerdas, para saber qué longitudes de onda y qué frecuencias se pueden producir, necesitamos tener en cuenta la longitud del tubo y las condiciones de frontera.

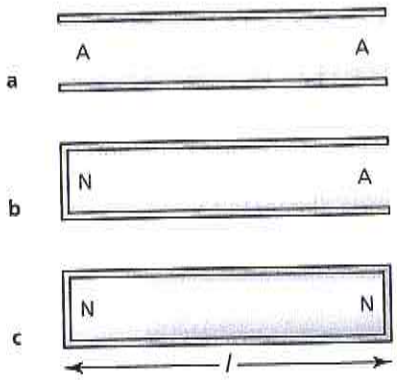


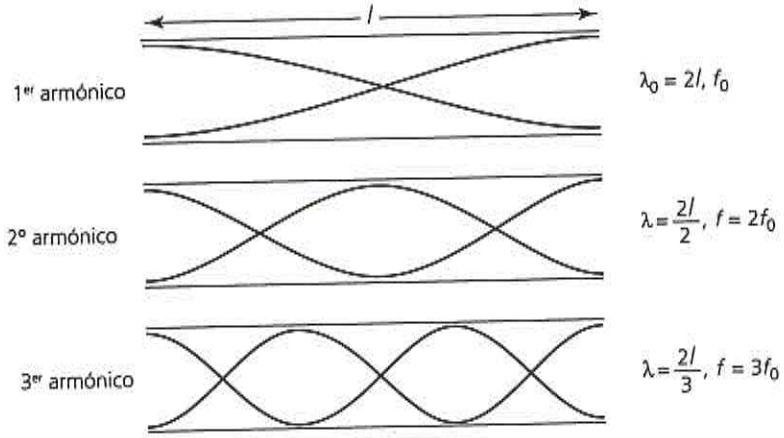
Figura 4.98
Nodos y antinodos en los extremos de tubos abiertos y cerrados

Como ilustración de esto último consideremos la Figura 4.98. En el diagrama **a** el tubo está abierto por ambos extremos, por tanto debe haber antinodos, A, en los extremos y al menos un nodo en medio. En el diagrama **b** el tubo está abierto por un extremo (antinodo) y cerrado por el otro (nodo, N). En el diagrama **c** el tubo está cerrado por ambos extremos, de modo que debe haber nodos en los extremos y al menos un antinodo en medio.

En la Figura 4.99 se representan los tres primeros armónicos de un tubo abierto por ambos extremos. La longitud de onda del primer armónico (el doble de la distancia entre nodos o antinodos consecutivos) es $2l$. (Observemos que las representaciones gráficas de ondas estacionarias pueden ser confusas: las curvas del diagrama indican la amplitud de la vibración. No deben confundirse con las ondas transversales).

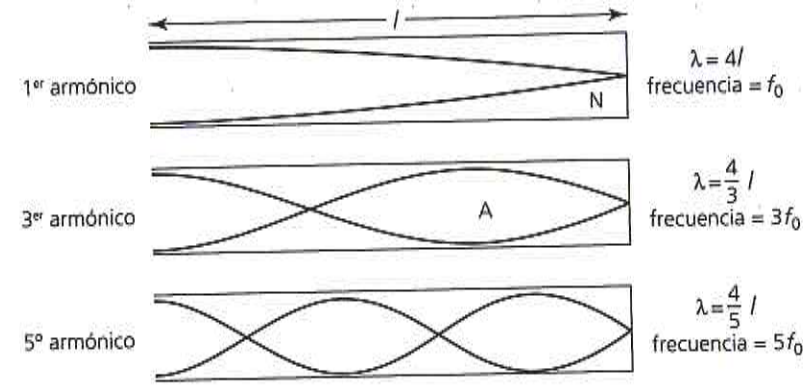
Un tubo cerrado por ambos extremos también tiene un primer armónico con una longitud de onda $2l$.

Figura 4.99
Los primeros tres armónicos de un tubo abierto por ambos extremos

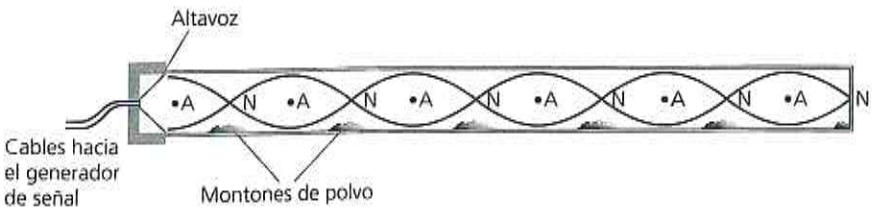


En la Figura 4.100 se representan los tres primeros armónicos posibles de un tubo abierto por un extremo y cerrado por el otro. En estas circunstancias solo son posibles los armónicos impares. El primer armónico tiene una longitud de onda de $4l$.

Figura 4.100
Armónicos de un tubo abierto por un extremo

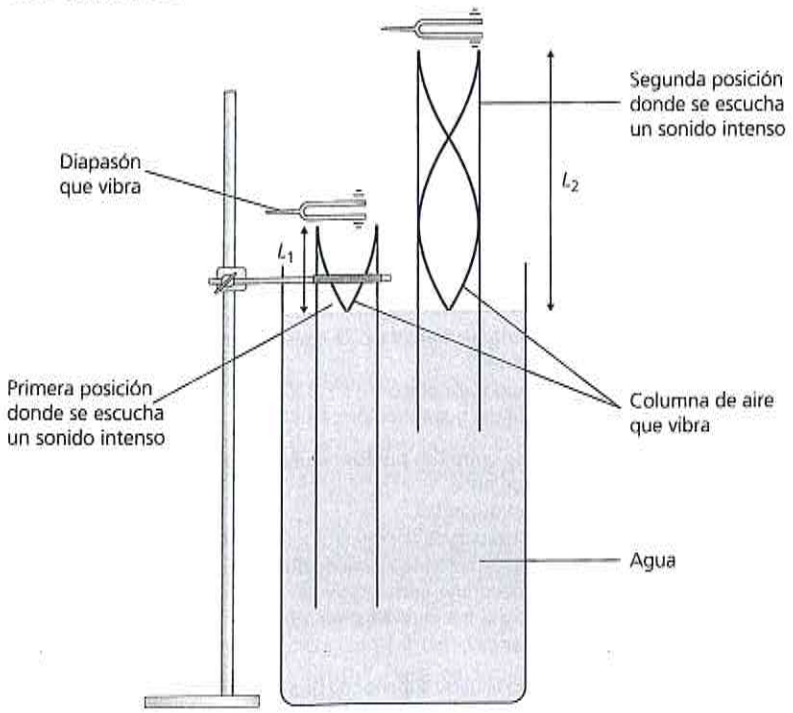


En la Figura 4.101 se muestra un posible experimento para observar ondas estacionarias de sonido. Se coloca un altavoz cerca del extremo abierto de un tubo largo transparente con el otro extremo cerrado. Se esparce polvo a lo largo del tubo, de manera que cuando se enciende el altavoz y se ajusta cuidadosamente la frecuencia, se observa que el polvo se amontona. Este fenómeno se debe a que el polvo tiende a desplazarse desde lugares donde hay mucha vibración (antinodos) hacia lugares donde no hay vibración (nodos).



■ **Figure 4.101**
Experimento para observar ondas estacionarias de sonido con un altavoz

Para observar ondas estacionarias en el aire del interior de un tubo se puede emplear un **diapasón**, como se muestra en la Figura 4.102. Se fija un diapasón que vibra en el extremo abierto de un tubo, que está abierto por arriba y cerrado por abajo al nivel del agua. Se aumenta progresivamente la altura del tubo por encima del agua hasta que se escucha un sonido intenso, que se produce cuando la frecuencia del diapasón coincide con la frecuencia del primer armónico de la columna de aire. Si se vuelve a aumentar la altura del tubo por encima del agua se pueden escuchar más armónicos.



■ **Figura 4.102**
Experimento para observar ondas estacionarias con un diapasón

En este experimento se pueden realizar medidas que permiten determinar la velocidad del sonido. Y al contrario, si se conoce la velocidad del sonido en el aire, el experimento puede servir para determinar la frecuencia del diapasón.

Ejemplo resuelto

13 a Si el diapasón de la Figura 4.102 vibra a una frecuencia de 659 Hz, calcula la longitud L_1. (Considera que la velocidad del sonido en aire es $340\,m\,s^{-1}$.)

b ¿Hasta qué altura hay que elevar el tubo para obtener la siguiente posición en la que se escucha un sonido intenso?

a

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{659} = 0{,}516\,m$$

Esta longitud de onda corresponde al cuádruple de la longitud del tubo (véase Figura 4.100).

Por tanto,

$$L_1 = \frac{0{,}516}{4} = 0{,}129\,\text{m}$$

En realidad se trata de una respuesta aproximada porque los antinodos no se producen exactamente en los extremos abiertos de los tubos. (Si se requiere una respuesta más exacta, para el cálculo se puede realizar una «corrección por extremo» que está asociada al diámetro del tubo).

b Consideremos la Figura 4.102. En la primera posición la columna de aire contiene un cuarto de longitud de onda. En la segunda posición contiene tres cuartos de longitud de onda. Por tanto, se ha elevado media longitud de onda, es decir 0,258 m.

Resumen de las diferencias entre las ondas estacionarias y las ondas viajeras

	Ondas estacionarias	Ondas viajeras
Patrón de onda	inmóvil (estacionario)	viajero (progresivo)
Transferencia de energía	no hay transferencia de energía	se transfiere energía a través del medio
Amplitud (suponiendo que no hay disipación de energía)	la amplitud en cada lugar es constante pero varía con la posición entre nodos; amplitud máxima en los antinodos, amplitud cero en los nodos	todas las oscilaciones tienen la misma amplitud
Fase	todas las oscilaciones entre nodos consecutivos están en fase	las oscilaciones separadas una longitud de onda están en fase; las oscilaciones separadas menos de una longitud de onda no están en fase
Frecuencia	todas las oscilaciones tienen la misma frecuencia	todas las oscilaciones tienen la misma frecuencia
Longitud de onda	el doble de la distancia entre nodos consecutivos	distancia más corta entre puntos en fase

Tabla 4.3 *Comparación entre las ondas estacionarias y las ondas viajeras*

63 El primer armónico de una cuerda de longitud 123 cm se produce para una frecuencia de 23,8 Hz.
- **a** ¿Cuál es la velocidad de la onda?
- **b** ¿Cuál es la frecuencia del tercer armónico?
- **c** ¿Cuál es la longitud de onda del quinto armónico?

64 **a** ¿Cuál es la diferencia de fase entre dos puntos de una onda estacionaria que están:
- i separados una longitud de onda
- ii separados media longitud de onda?

b La distancia entre nodos consecutivos del tercer armónico de una cuerda tensada es 18,0 cm, con una frecuencia de 76,4 Hz. Dibuja esquemáticamente la forma de onda de este armónico.
c Añade las formas de onda del primer armónico y del cuarto armónico sobre el mismo esquema anterior.
d Calcula la longitud de onda y la frecuencia del quinto armónico.
e ¿Cuál es la velocidad de la onda?

65 **a** Se hace oscilar de lado a lado la parte superior de una cadena vertical de 2,1 m de longitud con el objeto de generar una onda estacionaria. Si suponemos que la velocidad de la onda a lo largo de la cadena es constante con valor $5{,}6\,\text{m}\,\text{s}^{-1}$, ¿qué frecuencia se necesita para producir el segundo armónico?
b En realidad la velocidad de la onda a lo largo de la cadena *no* es constante y como consecuencia de ello la onda estacionaria tiene una longitud de onda variable. Sugiere un motivo por el que la velocidad no es constante.

66 Una cuerda de guitarra tiene el primer armónico en una frecuencia de 262 Hz.
- **a** Sugiere qué le ocurre a la velocidad de las ondas cuando se aumenta la tensión de la cuerda.
- **b** Si se ajusta la cuerda de manera que la velocidad de la onda aumente, explica qué le sucede a la frecuencia del primer armónico.
- **c** Sugiere por qué una onda viaja más lentamente por una cuerda más gruesa (suponiendo el mismo material y que esté sometida a la misma tensión).
- **d** Explica por qué las cuerdas más gruesas (suponiendo el mismo material, la misma longitud y la misma tensión) producen notas de frecuencia más baja.

67 Dibuja esquemáticamente los tres primeros armónicos de un tubo cerrado por ambos extremos.

68 Los tubos A y B son similares y tienen la misma longitud. El tubo A está cerrado por un extremo y el tubo B está abierto por ambos extremos. Si la frecuencia del primer armónico de A es 180 Hz, ¿cuál es la frecuencia del primer armónico de B?

69 Si la frecuencia utilizada en el experimento de la Figura 4.101 es 6,75 kHz y los montones de polvo están separados 2,5 cm, ¿cuál es la velocidad de las ondas de sonido?

70 ¿Qué longitud debe tener el tubo de un órgano (abierto por un extremo, véase Figura 4.103) para producir un armónico de frecuencia 90 Hz? (Utiliza velocidad del sonido = 340 $m s^{-1}$)

71 Un tubo de órgano abierto por ambos extremos tiene un segundo armónico de frecuencia 228 Hz.
- **a** ¿Cuál es su longitud?
- **b** ¿Cuál es la frecuencia del tercer armónico?
- **c** ¿Cuál es la longitud de onda del cuarto armónico?
- **d** Sugiere una ventaja del uso de tubos de órgano cerrados por un extremo frente a los que están abiertos por ambos extremos.

72 **a** En un experimento como el que se muestra en la Figura 4.102 se utiliza un diapasón de frecuencia 480 Hz y se escucha el primer armónico cuando la longitud del tubo es de 18,0 cm. Utiliza estas cifras para determinar un valor de la velocidad del sonido en aire.
- **b** Se repite el experimento con un diapasón distinto de frecuencia desconocida. Si el tercer armónico se escucha cuando la longitud de la columna de aire es 101,4 cm, ¿cuál es la frecuencia del diapasón?

Figura 4.103
En este órgano de iglesia los tubos de madera están abiertos por un extremo y los de metal que hay detrás están abiertos por ambos extremos

Aplicaciones

Diseño de hornos microondas

La frecuencia de las microondas que se utilizan para cocinar alimentos se escoge de manera que las microondas sean absorbidas por el agua y otras moléculas polares de los alimentos. Estas moléculas están cargadas positivamente en un extremo y negativamente en el otro. El campo electromagnético oscilante de las microondas hace vibrar las moléculas de los alimentos y produce un aumento de su energía cinética, lo que se traduce en que el alimento se calienta. La mayoría de los hornos microondas funcionan a una frecuencia de 2,45 GHz. Esta frecuencia de radiación es penetrante, lo que significa que el alimento no se cocina solo superficialmente.

Las paredes, el suelo y el techo del horno son metálicos para asegurar que las microondas no atraviesen el horno y salgan al exterior. La puerta puede tener una malla metálica (con orificios) que refleja las microondas pero permite el paso de la luz (a causa de su longitud de onda mucho menor), lo que permite visualizar el contenido del horno desde fuera.

Las microondas se reflejan en las paredes del horno y por tanto estas no absorben energía, como sí ocurre en otros tipos de hornos. El efecto «captura» de las microondas es el principal motivo por el que este tipo de hornos permiten cocinar de forma muy rápida y eficiente. Sin embargo, las microondas reflejadas en las paredes se pueden combinar para producir diversos tipos de ondas estacionarias en el interior del horno, lo que puede dar lugar a que los alimentos se cocinen de manera desigual. Para reducir este efecto se pueden «remover» las microondas mediante un deflector giratorio cuando entran en el espacio de cocción, o bien se puede colocar el alimento sobre un plato giratorio, o bien se puede remover el alimento a mano.

1 Calcula la longitud de onda de las microondas que se utilizan para cocinar.

2 Diseña un experimento para estudiar la presencia significativa de nodos y antinodos en un horno microondas. ¿Qué separación entre nodos cabe esperar?

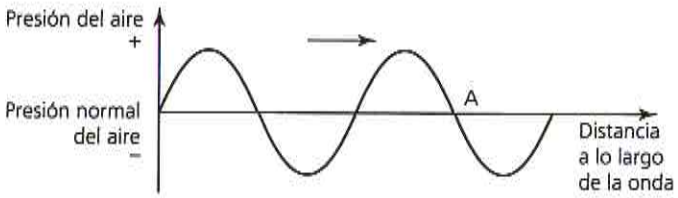
Selección de preguntas de examen

Hoja 1 preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 Una onda transversal viaja por una cuerda tensada. Consideremos dos puntos de la cuerda que están separados exactamente una longitud de onda. Las velocidades de la cuerda en estos dos puntos siempre:

A. son iguales entre sí
B. son constantes
C. tienen sentidos contrarios
D. están en una dirección paralela a la dirección de desplazamiento de la onda.

2 En esta gráfica se representa una onda de sonido desplazándose por el aire. La onda se desplaza en la dirección y sentido indicados por la flecha. Consideremos el punto A.



La presión del aire en A:

A. es cero
B. es siempre constante
C. está a punto de aumentar
D. está a punto de disminuir.

3 Una onda progresiva transversal se transmite a través de un medio. La mejor descripción de la velocidad de la onda es:

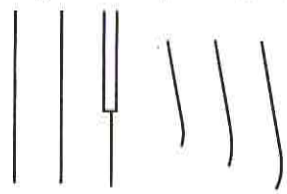
A. la velocidad a la que se transfiere la energía
B. la velocidad media de las partículas que oscilan en el medio
C. la velocidad del medio
D. la velocidad de la fuente de las ondas.

4 Las ondas luminosas de longitud de onda λ, frecuencia f y velocidad de desplazamiento c inciden sobre un material transparente con índice de refracción 1,6. ¿Cuál de las combinaciones siguientes describe las propiedades ondulatorias de las ondas luminosas transmitidas?

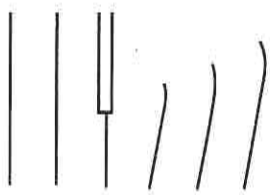
A. longitud de onda $1{,}6\lambda$; velocidad c
B. frecuencia $1{,}6f$; velocidad $\frac{c}{1{,}6}$
C. longitud de onda $\frac{\lambda}{1{,}6}$; frecuencia f
D. longitud de onda λ; velocidad $\frac{c}{1{,}6}$

5 Cuando los frentes de onda planos encuentran un obstáculo pueden experimentar una difracción. ¿Cuál de los diagramas siguientes representa mejor este efecto?

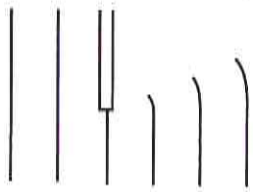
A.



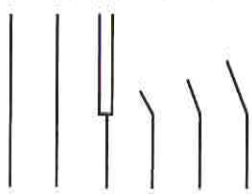
B.



C.



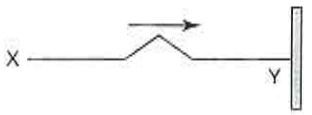
D.



6 ¿Cuál de las definiciones siguientes se puede aplicar a la longitud de onda de una onda transversal progresiva (viajera)?

A. la distancia entre dos crestas cualesquiera de la onda
B. la distancia entre una cresta y un valle contiguo
C. la amplitud de una partícula de la onda durante una oscilación de la fuente
D. la distancia que se desplaza un frente de onda durante una oscilación de la fuente.

7 En este diagrama se representa un pulso que se desplaza por una cuerda desde X a Y. El extremo Y de la cuerda está atado a un soporte fijo

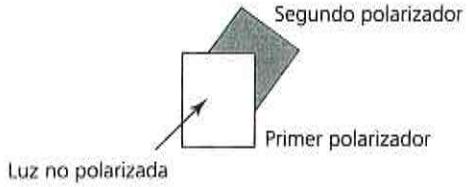


Cuando el pulso llega al extremo Y:

A. desaparece
B. provoca la oscilación hacia arriba y hacia abajo del extremo Y de la cuerda
C. se refleja y se invierte
D. se refleja y no se invierte.

© *IB Organization*

8 Sobre un polarizador incide luz no polarizada de intensidad I_0. La luz transmitida incide a continuación sobre un segundo polarizador. El eje del segundo polarizador forma un ángulo de 60° con el eje del primer polarizador.



El coseno de 60° es $\frac{1}{2}$. La intensidad de la luz transmitida a través del segundo polarizador es:

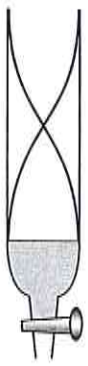
A. I_0 **B** $\frac{I_0}{2}$ **C** $\frac{I_0}{4}$ **D** $\frac{I_0}{8}$

© *IB Organization*

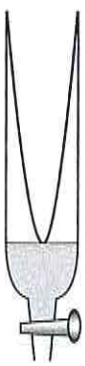
9 ¿Cuál de las expresiones siguientes describe las ondas estacionarias de una cuerda tensada?

A. Todos los puntos de las ondas se desplazan con la misma amplitud.
B. Todos los puntos de las ondas se desplazan con la misma fase.
C. Todos los puntos de las ondas se desplazan con la misma frecuencia.
D. La longitud de onda es la distancia entre antinodos consecutivos.

10 Una fuente de sonido que emite a una única frecuencia se coloca sobre el extremo superior de un tubo que está lleno de agua. Cuando se deja salir el agua del tubo se escucha un sonido intenso por primera vez cuando el agua está cerca del fondo del tubo, tal como se representa en todos los diagramas. ¿Cuál de estos diagramas representa mejor el patrón de ondas estacionarias que ha producido este sonido intenso?

A.


B.

C.


D.

11 La intensidad de un sonido a una distancia de 2 m de una fuente puntual es $1{,}8 \times 10^{-4}\,\mathrm{W\,m^{-2}}$. ¿Cuál de los valores siguientes estima mejor la intensidad ($/10^{-4}\,\mathrm{W\,m^{-2}}$) a 6 m de la fuente? Supongamos que no hay absorción del sonido en el aire.

A. 0,9 **B.** 0,6 **C.** 0,3 **D.** 0,2

12 La luz reflejada sobre una superficie se puede polarizar parcialmente. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes sobre este efecto es correcta?

A. El material debe ser un conductor metálico.
B. El material debe ser transparente.
C. La magnitud de la polarización depende del ángulo de incidencia.
D. El efecto solo se produce cuando la frecuencia de la luz supera una frecuencia umbral.

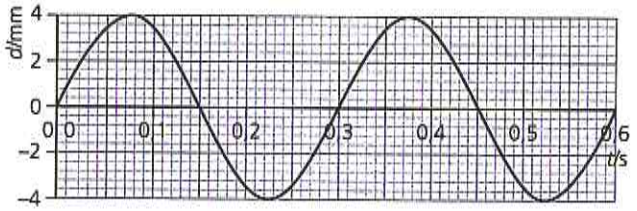
13 La luz que viaja por un medio rodeado por aire puede experimentar en determinadas circunstancias una reflexión interna total. Este efecto solo se produce cuando:

A. el índice de refracción del medio por el que viaja la luz es menor que 1
B. la luz incide sobre la superficie del medio con un ángulo de incidencia mayor que el ángulo crítico
C. la velocidad de la luz en aire es menor que la velocidad de la luz en el medio
D. la luz es monocromática.

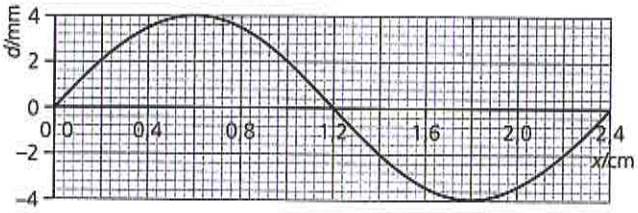
Hoja 2 preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 a En la gráfica 1 se representa la variación del desplazamiento *d* de una onda viajera (progresiva) con respecto al tiempo *t*.
En la gráfica 2 se representa la variación del desplazamiento *d* con respecto a la distancia *x* sobre la misma onda.

Gráfica 1

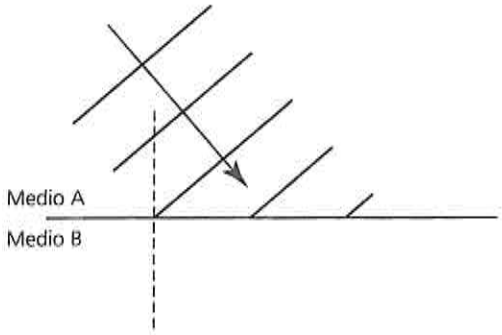


Gráfica 2



i. Enuncia qué se entiende por onda viajera. (1)
ii. Utiliza las gráficas para determinar la amplitud, la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad de la onda. (4)

b En este diagrama se representan frentes de onda que inciden sobre una frontera entre dos medios A y B.



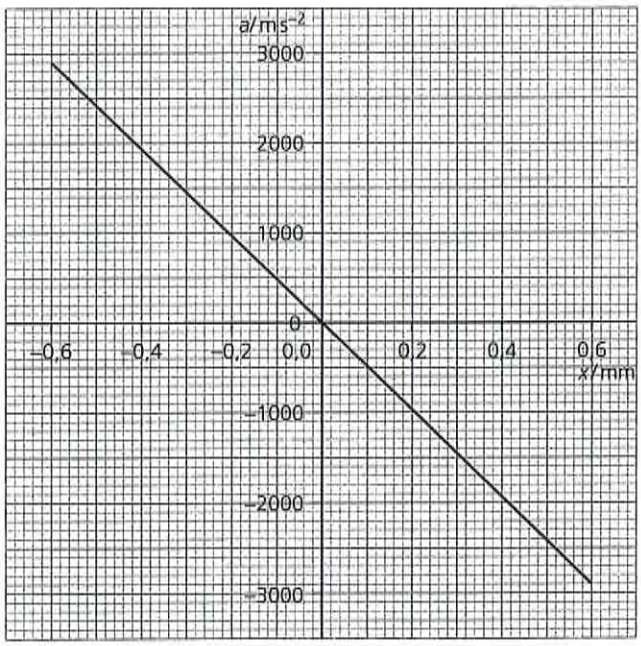
El cociente índice de refracción del medio B/índice de refracción del medio A es 1,4.
El ángulo que forma un frente de onda incidente con la normal a la superficie es 50°.

i Calcula el ángulo que forma un frente de onda refractado con la normal a la frontera. (3)

ii Copia el diagrama y dibuja tres frentes de onda para representar la refracción de la onda en la frontera. (3)

© *IB Organization*

Un objeto vibra en el aire. En el gráfica inferior se representa la variación de la aceleración *a* del objeto con respecto al desplazamiento *x*.



a Enuncia y explica dos razones por las que la gráfica indica que el objeto está describiendo un movimiento armónico simple. (4)

b Demuestra que la frecuencia de oscilación es 350 Hz a partir de los datos de la gráfica. (4)

c El movimiento del objeto origina una onda de sonido progresiva (viajera) longitudinal.

i. Enuncia qué se entiende por onda progresiva longitudinal. (2)

ii. La velocidad de la onda es 330 $m s^{-1}$. Calcula su longitud de onda a partir de la respuesta al apartado **b**. (2)

© *IB Organization*

Se genera una onda estacionaria de sonido en una columna de aire de longitud 38 cm y abierta por ambos extremos.

a Describe dos características que diferencian una onda estacionaria de una onda viajera. (2)

b Si la velocidad del sonido es 340 ms^{-1}, ¿cuál es la frecuencia de la onda estacionaria? (2)